

TIESILTOJEN TILASTOLLISET AINEMENEKKI- JA
KUSTANNUSMALLIT

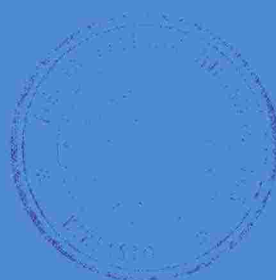
TIE- JA VESIRAKENNUSHALLITUS
SILLANSUUNNITTELUTOIMISTO

INSINÖÖRITOIMISTO Y-SUUNNITTELU

TVH 72344I

HELSINKI 1985

08
TIE-



85 0411

TIESILTOJEN TILASTOLLISET AINEMENEKKI- JA KUSTANNUSMALLIT

TIE- JA VESIRAKENNUSHALLITUS
SILLANSUUNNITTELUTOIMISTO

INSINÖÖRITOIMISTO Y-SUUNNITTELU

HELSINKI 1985

ISBN 951-46-7248-8

ALKUSANAT

Tämä selvitys käsittelee siltojen ainemenekkeistä ja kustannuksista laadittuja eri rakenneosien matemaattisia malleja, joita voidaan käyttää siltavaihtoehtojen kustannusten ennustamiseen esisuunnittelussa ja yleissuunnittelussa.

Selvityksen on laatinut tekn.lis. Heikki Rautakorpi insinööritoimisto Y-Suunnittelussa. Työtä valvovaan ryhmään ovat kuuluneet dipl.ins. Matti Kuusivaara (pj.) ja vs. yli-ins. Erkki Isoksela TVH:n sillansuunnittelutoimistosta, dipl.ins. Mauno Peltokorpi TVH:n sillanrakennustoimistosta ja professori Heimo Paavola Helsingin teknillisestä korkeakoulusta.

SISÄLLYSLUETTELO

	Sivu
Tiivistelmä	4
Merkinnät	8
 1. Johdanto	 10
 2. Kirjallisuusselvitys	 13
2.1 Tilastomatematiikka	13
2.2 Siltojen ainemenekit	13
2.3 Kustannukset	15
 3. Ainemenekkimallit	 18
3.1 Yleistä	18
3.2 Päällysrakenne	19
3.21 Terässillat	20
3.22 Betoniset palkki- ja kotelosillat	26
3.23 Betoniset laattasillat	32
3.24 Vertailu ulkomaiseen aineistoon	38
3.3 Alusrakenteet	45
3.31 Maatuet	46
3.32 Välituet	49
3.4 Virhetarkastelu	53
 4. Kustannusmallit	 57
4.1 Yleistä	57
4.2 m ² -mallit	58
4.3 Yksikkökustannusmalli	70
4.4 Kustannuslajimalli	83
4.5 Virhetarkastelu	84
 5. Esimerkki	 87
 6. Johtopäätökset	 92
 Kirjallisuusluettelo	 94

TIIVISTELMÄ

Siltojen ainemenekki- ja kustannusmalleja on käsitelty kirjallisuudessa verraten vähän. Kirjallisuustutkimuksen tuloksena esitetään yksi ainemenekkimalli ja viisi kustannusmallia. Siltojen ainemenekkitietoja löytyy kyllä kirjallisuudesta, mutta yleensä niitä ei ole esitetty matemaattisina malleina, vaan on tyydytty taulukoihin tai graafisiin esityksiin.

Tutkimuksen pääosa keskittyy suomalaisiin tiesiltoihin. Tilastoaineistona käytetään TVH:n keräämiä ainemenekki- ja kustannustietoja. Siltojen ainemenekit ja kustannukset esitetään matemaattisten mallien avulla. Mallien muoto perustuu teoreettisiin päätelmiin, mutta kertoimien numeroarvot on yleensä laskettu regressioanalyysin avulla.

Sillan ainemenekkejä arvioitaessa se ajatellaan levymäisistä osista kootuksi rakenteeksi. Siltakannen leveytenä pidetään sillan hyödyllistä leveyttä ja pituutena jännemittojen summaa. Jos sillassa on päätyulokkeet, ne lasketaan mukaan kansilevyn pituuteen. Tuet muodostuvat suorakaiteen muotoisista seinälevyistä. Välituet jaetaan kahteen osaan: vedenpinnan yläpuoliseen kuivavaluosaan ja vedenpinnan alapuoliseen osaan, joka käsittää vedenalaisen betonivalun. Tukilevyjen alapääät ajatellaan tuetuiksi betonisten lyöntipaalujen varaan.

Sillan ainemenekit lasketaan levyn pinta-alayksikköä kohti paitsi paalumäärä, joka lasketaan tuen leveysyksikköä kohti. Päälyysrakenteen osalta tarkastellaan teräs-, betoni- ja muottimenekkejä ja niille johdetaan matemaattiset kaavat. Alusrakenteiden osalta määritetään ainemenekkimallit kuivavalun betonimäärälle, vedenalaisen valun betonimäärälle ja paalumäärälle. Tukien muotti- ja teräsmenekit lasketaan betonikuutiota kohti.

Siltakannen ainemenekkimallit esitetään erikseen liittopalkkisilloille, jännitetyille palkki- ja kotelosilloille sekä betonisille laattasilloille. Betonisten palkkisiltojen ainemenekit voidaan arvioida jännitetyille palkkisilloille johdettujen mallien avulla.

2-palkkisen liittopalkkisillan rakenneteräsmäärälle on laskettu malli

$$Q_{ss} \text{ (kg/m}^2\text{)} = 24,3 + 0,0748 \cdot \frac{l^2}{h} + 272 \cdot \frac{h}{b}$$

jossa $l = \frac{\sum l^2}{\sum 1}$ on sillan painotettu jännemitta

h on siltakannen rakennekorkeus ja

b on sillan hyödyllinen leveys

Yksiköt ovat [m] .

Jännitetyn sillan teräsmenekkiä kuvaa parhaiten kokonaisteräsmäärä, joka määritellään summana:

$$4,5 \cdot \text{jänneteräsmäärä} + \text{betoniteräsmäärä}.$$

Sille on saatu malli

$$4,5 \cdot Q_{ps} + Q_{rs} (\text{kg/m}^2) = 91,3 + 0,1122 \cdot \frac{l^2}{h} + 46,4 \cdot \frac{h}{b}.$$

Kaava pätee sekä laattapalkki- että kotelosillalle.

Jännitetyn sillan betonimäärälle on saatu malli

$$Q_c (\text{m}^3/\text{m}^2) = 0,411 + 0,000054 \cdot \frac{l^2}{h} + 0,834 \cdot \frac{h}{b}.$$

Laattasillan betonimäärä voidaan laskea suoraan poikkileikkausmitoista. Jos laatan reunaviisteiksi oletetaan 1:3, saadaan

$$Q_c (\text{m}^3/\text{m}^2) = h + 0,1575 \cdot \frac{l}{b} + 1,7 \cdot \frac{h}{b} - 3 \cdot \frac{h^2}{b}.$$

Käytännössä laattasillan betonimäärä on keskimäärin 5 % tätä teoreettista arvoa suurempi. Massiivisen laattasillan teräsmäärälle on laskettu regressiomalli

$$Q_{rs} (\text{kg/m}^2) = 67,1 + 0,133 \cdot l^2 + 2,68 \cdot \frac{l}{bh}.$$

Kansirakenteen ainemenekit poikkeavat mallien antamista arvoista keskimäärin 6...14 %.

Johdettuja kansirakenteen ainemenekkimalleja verrataan myös ulkomaiseen tilastoaineistoon. Keskimäärin mallit antavat suhteellisen hyvän arvion, mutta hajonta on noin kaksinkertainen suomalaiseseen aineistoon verrattuna.

Esimerkkejä alusrakenteiden ainemenekkimalleista ovat betonisillan välituelle saadut betonimäärämallit:

$$Q_c (\text{m}^3/\text{m}^2) = 1,75 - 0,024 \cdot b - 0,0055 \cdot l_i - 0,038 \cdot (H_i - D_i)$$

$$Q'_c (\text{m}^3/\text{m}^2) = 4,10 - 0,182 \cdot b + 0,020 \cdot l_i - 0,040 \cdot H_i$$

joissa Q'_c on vedenalaisen betonin määrä

l_i on tuen viereisten jännemittojen keskiarvo

H_i on Tsv - anturan alapinta ja

D_i on keskivesi - anturan alapinta

Malleihin verrattuna tilastoaineiston betonimäärien hajonta on noin 15 %.

Siltojen kustannusmallit jaetaan raportissa kolmeen ryhmään seuraavasti:

- m²-malli
- yksikkökustannusmalli ja
- kustannuslajimalli

Numeeriset mallit esitetään kahdelle ensinmainitulle ryhmälle. Mallit perustuvat toteutuneisiin siltojen rakennuskustannuksiin.

m²-mallin avulla arvioidaan sillan kokonaiskustannukset kansineliötä kohden. Keskisuurille silloille malli esitetään graafisessa muodossa (kuva 4.1, s. 60) siten, että se huomioi erikseen kuormituksen (kevyen liikenteen silta vai ajoneuvoliikenteen silta), sillan ympäristön (maasilta vai vesistösilta), perustamistavan ja hyödyllisen leveyden vaikutuksen. Malli perustuu noin 300 sillan rakennuskustannusten analysointiin.

Suurille tiesilloille esitetään m²-malli regressiokaavana

$$C \text{ (mk/m}^2\text{)} = 3400 + 4765 \left(\frac{1}{\sqrt{b}} - \frac{1}{3} \right) + 20,89 \cdot (2D_{\max} + E - 40) - 35,7 \cdot (n - 4)$$

jossa b on sillan hyödyllinen leveys

D_{max} on suurin vesisyvyys

E on Tsv - paalujen tunkeutumissyvyys syvimmällä olevan tuen kohdalla ja

n on sillan jänteiden lukumäärä.

Kustannusindeksi on 100/80.

Tilastoaineistoon sovellettuna malli antaa 7...12 % hajonnan.

Yksikkökustannusmalli perustuu ainemenekkejä vastaavien suoritteiden ja yksikkökustannusten käyttöön. Ainemenekit saadaan raportin alkuosassa esitetyistä ainemenekkimalleista. Yksikkökustannukset voidaan arvioida TVH:n yksikköhintaluetelon mukaan.

Regressiolaskennan avulla on saatu seuraava yksikkökustannusmalli:

$$C \text{ (mk)} = 48900 + 58000 \cdot D_{\max} + 1,009 \cdot (C_d + C_s) + 2,010 \cdot (C_a + C_i)$$

jossa D_{\max} on suurin anturan alapinnan syvyys keski-vedestä mitattuna

C_d on kansirakenteen kustannus

C_s on kannen telineiden ja pintarakenteiden kustannus

C_a on maatukien kustannus

C_i on välitukien kustannus

Kustannusindeksi on 100/80.

Numeeristen kertoimien avulla huomioidaan puuttuvat kustannuserät ja yhteiskustannukset. Tilastoaineistoon sovelletuna malli antaa n. 9 % hajonnan.

Raportin lopussa esitetään sovellutusesimerkki, jossa arvioidaan liittopalkkisillan ainemenekit ja kustannukset ainemenekki- ja kustannusmallien avulla.

Merkinnät

A	pinta-ala, pinta-alavektori
C	kustannus
D_i	keskivesi - anturan alapinta
D_{max}	suurin vesisyvyys keskiveden aikana
E	perustamissyvyys Tsv:sta mitattuna
F	yksikkökustannusmatriisi tai -vektori
G	geometriavektori
H	Tsv - anturan alapinta
J ja K	ainemenekkimallin kerroinvektori ja -matriisi
Q	ainemenekki, ainemenekkivektori tai vastaava suorite
R	korrelaatiokerroin
Y	ainemenekkitaulukossa sillan suunnitteluvuosi, kustannustaulukossa valmistumisvuosi
b	sillan hyödyllinen leveys
c	yksikkökustannus
h	siltakannen rakennekorkeus (viisteellisessä sillassa = $\frac{h_{tuki} + h_{kenttä}}{2}$)
k	numeerinen kerroin
l	$\frac{\sum l_i^2}{\sum l_i}$ painotettu sillan jännemitta
l_a	reunajänteen pituus
l_i	välituen viereisten jännemittojen keskiarvo
m	keskiarvo (mean)
n	lukumäärä
$r =$	$\frac{Q_{suunnitelma}}{Q_{malli}}$ tai $\frac{C_{toteutunut}}{C_{malli}}$
$v =$	$\frac{s.dev}{mean}$ variaatiokerroin
	sillan vinous

Alaindeksit

a	maatuki (abutment)
c	betoni (concrete)
d	kansi (deck)
f	muotti (formwork)
i	välituki (intermediate support)
i,j,k,l	muuttuvia indeksejä
m	aine (material)
p	paalut 300x300 (piles)
ps	jänneteräs $f_{py} = 180 \text{ MN/m}^2$ (prestressed steel)
prs	muunnettu kokonaisteräsmäärä (4,5 ps + rs)
r	kaide (railing)
rs	betoniteräs (reinforcing steel)
s	pinta (surface)
ss	rakenneteräs (structural steel)
su	telineet (support)
w	työ (work)

1. JOHDANTO

Sillan rakennuskustannukset määräytyvät pääosin jo varsin aikaisessa suunnitteluvaiheessa. Jo tien paikkaa valittaessa tehdään huomattavia sillan kustannuksiin vaikuttavia päätöksiä. Tässä suunnitteluvaiheessa kiinnitetään kustannusmielessä huomiota koko projektiin, josta silta muodostaa vain osan. Kuitenkin sillan kustannusennuste on jo tässä vaiheessa tärkeä päätöksenteon peruste. Sillansuunnittelija joutuu tällöin vastaamaan seuraavanlaisiin kysymyksiin.

- Mitkä ovat joen yli rakennettavan sillan kustannukset, kun tien pituusleikkaus ja vaaditut aukkomitat ovat tunnettuja ?
- Paljonko sillan rakennuskustannus nousee, jos sen yhteyteen sijoitetaan tietyn levyinen kevyen liikenteen väylä ?
- Paljonko sillan rakennuskustannus nousee, jos sen rakennekorkeutta pienennetään esim. 0,5 m ?

Tällaisiin kysymyksiin vastaaminen edellyttää suunnittelijalta monipuolista kokemusta ja arviointikykyä. Tässä vaiheessa ei yleensä ole mahdollista lähteä mitoittamaan erilaisia siltavaihtoehtoja suoritearvioiden saamiseksi kustannusarvion perustaksi. Työn helpottamiseksi olisi kehitettävä helppokäyttöisiä arviointimenetelmiä, joissa käytetään hyväksi toteutuneista kohteista saatua palautetta.

Sillan yleissuunnitteluvaiheessa verrataan toisiinsa erilaisia siltavaihtoehtoja. Tällöin esille tulevia kysymyksiä ovat:

- Mikä on kustannusmielessä pehmeikkösillan optimaalinen pituus ?
- Mikä on sillan optimaalinen jännejako ?
- Kumpi on kustannuksiltaan edullisempi, terässilta vai betonisilta ?
- Millainen poikkileikkausmuoto on edullinen ?

Vertailussa on tärkeänä tekijänä sillan tai sen osan arvioitu rakennuskustannus, johon puolestaan vaikuttavat ainemenekit, työmenekit ja yksikkökustannukset. TVH:ssa omaksutun käytännön mukaan kustannusarvio laaditaan ainemenekkejä vastaavien suoritteiden ja yksikkökustannusten avulla. Ainemenekkien selvittäminen laskennallisesti on työläs tehtävä varsinkin jos tutkittavien siltavaihtoehtojen lukumäärä on suuri. Senvuoksi joudutaan käytännössä usein turvautumaan ainemenekkien arviointiin, jonka luotettavuus kasvaa suunnittelijan kokemuksen myötä. Varsinkin nuorille suunnittelijoille olisi suurta hyötyä menetelmistä, joiden avulla vaihtoehtovertailuja olisi nykyistä helpompi suorittaa.

Sillan rakennesuunnittelulla tarkoitetaan yleensä laskelmien, piirustusten ja työselityksen laatimista. Tässä vaiheessa valitaan lopullisesti siltatyypin ja sen rakenteelliset mitat. Rakennemittojen valinnan tulisi perustua sillan toiminnallisten vaatimusten ja ulkonäköseikkojen lisäksi rakenteelliseen optimointiin. Nykyisellään optimointimenetelmät perustuvat yleensä rakenteen staattisiin laskelmiin ja mitoittamiseen. Tehokkaista tietokoneista huolimatta optimointi tulee helposti kalliiksi ilman että siitä saavutetaan suurtakaan hyötyä. Lopputuloksena saatetaan vain todeta, että optimoitava käyrä on laakea ja eri tekijöiden vaikutus lopputulokseen on suhteellisen vähäistä. Senvuoksi olisi perusteltua kehittää yksinkertaistettuja menetelmiä, joiden avulla rakenteellista optimiratkaisua voitaisiin etsiä helpommin kuin monimutkaisilla tietokonesysteemeillä.

Sillansuunnitteluun samoinkuin yleensä kaikkeen työhön liittyy tärkeänä osana valvonta. Sen avulla pyritään varmistamaan suunnitelman tekninen moitteettomuus. Laajemmin ajatellen valvonnan avulla olisi yhtenäistettävä suunnitelmien taso. Sillanrakentamisen resurssit olisi käytettävä optimaalisesti siten, että yksittäisen siltakohteen varmuustaso poikkeaisi mahdollisimman vähän yleisestä tasosta. Valvonnan vaikeutena on se, että siltojen rakennemitat vaihtelevat siltapaikan mukaan, minkä vuoksi eri siltasuunnitelmien keskinäinen vertaaminen on vaikeata. Kaivattaisiin menetelmiä, joiden avulla siltasuunnitelmat saataisiin yhteismitallisiksi.

Tässä raportissa esitetään joukko matemaattisia apuvälineitä, joiden toivotaan helpottavan sillansuunnittelijoiden ja suunnittelukäytäntöä ohjaavien henkilöiden työtä eri suunnitteluvaiheissa. Osa aineistosta soveltuu lähinnä sillan esisuunnitteluun tieprojektin yhteydessä ja joitakin kohtia voidaan käyttää hyväksi jopa rakennesuunnitteluvaiheessa. Pääosa tuloksista on kuitenkin tarkoitettu palvelemaan sillan yleissuunnittelua.

Ainemenekkien arviointia varten esitetään eri siltatyypeille matemaattisia malleja, jotka perustuvat TVH:n sillansuunnitteluaineistoon. Muuttujiksi on valittu rakennetyyppien lisäksi siltapaikan tai sillan geometrisia mittoja. Päällysrakenteen ainemenekkimalleissa ovat muuttujina sillan painotettu keskimääräinen jännemitta, sillan hyödyllinen leveys ja sillan päällysrakenteen rakenteellinen paksuus.

Kustannusmallien laadinnassa on käytetty hyväksi siltojen toteutuneita rakennuskustannuksia, jotka on muutettu vuoden 1980 kustannustasoon. Se vastaa rakennuskustannusindeksin pistelukua 100. Kustannustason muutokset voidaan huomioida tierakennuskustannusindeksin kohdan "siltaurakat" avulla.

Tilastomatematiikalla on tärkeä sija mallien kehittämisessä. Todettujen poikkeamien merkitsevyyttä on tutkittu vari-anssianalyysin avulla. Suureiden keskinäisiä riippuvuuksia on selvitetty regressioanalyysillä. Siltatyypeittäin jaoteltu lähtöaineisto on kuitenkin varsin suppea antaakseen tilastomatematisessa mielessä luotettavia tuloksia. Sen-
vuoksi tutkimustyössä on käytetty paljon voimavaroja sen seikan selvittämiseen, ovatko kaikki lähtöarvot luotettavia. Kriittisessä kohdassa oleva virheellinen lähtöarvo voi aiheuttaa pahan vääristymän regressiomalliin. Tämä voidaan välttää valitsemalla mallille tarpeeksi yksinkertainen muoto ja jättämällä pois sellaiset lähtöarvot, jotka selvästi tekevät mallin epäloogiseksi.

Kotimaisen tilastoaineiston täydentämiseksi on aiheesta suoritettu kirjallisuusselvitys. Sen tuloksena esitetään joukko kirjallisuusviitteitä, jotka liittyvät siltojen ainemenekkeihin tai rakennuskustannuksiin.

2. KIRJALLISUUSSELVITYS

Tutkimukseen liittyi kirjallisuusselvitys, jossa haettiin lähinnä aiheeseen liittyvää ulkomaista kirjallisuutta. Lähteenä käytettiin seuraavia tietokantoja:

- IRRD (International road research documentation)
- COMPENDEX (Computerised engineering index)
- RSWB (Informationsverbundzentrum Raum und Bau)

Tietokonehakujen avulla löydettiin joukko aiheeseen liittyviä kirjallisuusreferaatteja. Kirjallisuusviitteet on lueteltu raportin liitteenä olevassa kirjallisuusluettelossa. Ne on jaettu kolmeen ryhmään seuraavasti:

- Tilastomatematiikka
- Siltojen ainemenekit
- Kustannukset

2.1 Tilastomatematiikka

Tilastollisen testauksen teoreettiset perusteet on esitetty lähteessä /4/. Tässä työssä käytettyjä testausmenetelmiä ovat varianssianalyysi ja regressioanalyysi. Niihin liittyvät käytännön laskutoimitukset voidaan suorittaa valmiita ohjelmia käyttäen.

Lähteissä /1/ ja /2/ on tarkasteltu tilastollisia jakautumia ja niiden tärkeimpiä ominaisuuksia. Eri tyyppisistä jakautumista mainittakoon normaalijakautuma ja logaritminen jakautuma. Jälkimmäistä käytetään tässä tutkimuksessa siltojen m^2 -kustannusten yhteydessä. Lähteessä /1/ on esitetty myös virhetarkastelun perusteita.

Lähteessä /3/ tarkastellaan rakenteiden optimointia tilastomatematiikkaa tehtävänä.

2.2 Siltojen ainemenekit

Tämän tutkimuksen tärkeimmät tietolähteet on mainittu kirjallisuusviitteinä /12/ ja /13/. Ne sisältävät viime vuosina rakennettujen TVH:n siltojen teoreettiset ainemenekit. Tiedot on kerätty siltasuunnitelmista.

Lähteissä /5/ ja /7/ luetellaan saksalaisten jännitettyjen betonisiltojen päällysrakenteiden ainemenekkejä. Aineisto on laaja ja käsittely varsin perusteellista. Luetteloista käyvät ilmi myös siltakannen päämitat ja poikkileikkaustyyppi. Lähteessä /5/ eri siltatyyppien betoni- ja teräsmäärät esitetään graafisesti jännemitan funktiona.

Jännitettyihin kotelopalkkisiltoihin keskittynyt raportti /14/ on hyvin perusteellinen ja sisältää runsaasti numero-tietoja. Ainemenekkien lisäksi esitetään mm. poikkileikkausmitat, pilareiden korkeudet ja joidenkin siltojen urak-kahinnat. Referoitujen siltojen lukumäärä on 173.

Raportin puutteena mainittakoon, että jänneterästen lujuus-luokkaa ei ole ilmoitettu. Samoin jää epäselväksi, miten suuri osa jänneteräksistä on sillan pituussuuntaisia.

Raportti sisältää runsaasti graafisia yhteenvedoja kotelo-siltojen poikkileikkausmuodoista, jännesuhteista ym. sillan geometriaan liittyvistä seikoista. Betoni- ja teräsmäärät esitetään graafisesti jännemitan funktiona.

Lähteessä /11/ esitetään edellä mainitun raportin yksityis-kohtaiset tiedot supistetussa muodossa. Tämän lisäksi tar-kastellaan kotelosiltojen laskemisessa käytettyjä teorioita.

Lähteessä /9/ analysoidaan suurimpien norjalaisten betoni-siltojen ainemenekkejä ja kustannuksia. Kustakin sillasta esitetään sivukuva, geometriatiedot, ainemenekkitietoja sekä urakkahinta. Betonin ja betoniteräksen määrä esitetään sekä taulukkomuodossa että graafisesti jännemitan funktiona. Kustannustiedoista mainittakoon urakkahinnat ja vesisyvyyden vaikutus tuen rakennuskustannuksiin. Indeksikorjauksessa huomioidaan erikseen työpalkkojen ja materiaalien vaikutus.

Lähdeteos /10/ sisältää myös erilaisten betonisiltojen aine-menekkitietoja.

Terässiltojen ainemenekkejä esitetään lähteissä /6/, /8/ ja /15/. Lähteessä /8/ tarkastellaan rautatiesilloista palkki- ja kaarisiltoja ja tiesilloista palkki-, ristikko-, kaari- ja vinoköysisiltoja.

Kunkin siltatyypin teräsmäärälle esitetään lineaarinen reg-ressiomalli.

Liittorakenteisen palkkisillan kokonaisteräsmäärälle on las-kettu kaava

$$g(\text{kg/m}^2) = 125 + 1,35 \cdot l_m, \quad (2.1)$$

jossa l_m on sillan jännemittojen keskiarvo.

Teräsmäärään on laskettu mukaan kansilaatan raudoitus. Läh-deaineisto käsittää 24 siltaa 11 eri maasta. Variaatioker-toimeksi ilmoitetaan 0,169.

2.3 Kustannukset

Lähteet /18/, /20/ ja /26/ eivät liity siltoihin, mutta ne sisältävät runsaasti rakennuskustannuksiin liittyvää perustietoa. Lähteessä /20/ paneudutaan varsin perusteellisesti tilastomatematiikkaan malleihin ja niiden käyttöön kustannusennusteissa.

Siltojen kustannusmalleja esitetään lähteissä /14/, /17/, /22/, /23/ ja /25/. Lähteessä /14/ on kehitetty jännite-tyille kotelosilloille kustannusmalli, joka perustuu urakointeihin. Se on muotoa

$$C = \frac{k_1}{A + k_2} + k_3 + k_4 l_{\text{med}}.$$

Merkinnät ovat: C on kustannus kansineliötä kohti
A on siltakannen pinta-ala
 l_{med} on keskimääräinen jännemitta
 k_1, k_2, \dots ovat vakioita

87 sillan aineistoon sovitettuna kaavalle on saatu muoto

$$C = \frac{300\,000}{A + 6000} + 28 + 0,80 \cdot l_{\text{med}} \quad (2.2)$$

Yksikkönä on (f / m^2) vuoden 1970 kustannustasossa. Aineiston hajonta mallin suhteen on 24 %.

Lähteessä /17/ sillan kustannusmallin muoto on

$$C(\text{rubl}) = (k_1 l^{k_2} + k_3 l) b \bar{z}_1 + \left(\frac{\bar{z}_1}{1} + 1 \right) C_i \quad (2.3)$$

jossa C_i on yhden tuen kustannus (rubl).

Tuntemattomat k-kertoimet on määritetty tietyn maantieteellisen alueen silloille neljälle eri hyötyleveydelle. Esimerkkinä mainittakoon 9,5 m levyisen sillan kertoimet:

$$\begin{aligned} k_1 &= 42,053 \\ k_2 &= 0,052 \\ k_3 &= 1,480. \end{aligned}$$

Kertoimet on määritetty pienimmän neliösumman menetelmällä tyyppisiltojen kansirakenteille lasketuista kustannusarvioista. Kustannusmallia on käytetty optimaalisen jännemitan laskemiseen.

Lähteessä /22/ esitetään liittopalkkisilloille tilastollinen kustannusmalli, jonka yksinkertaisin versio on (vuoden 1967 kustannustasossa)

$$C(f) = 6 b L + 621 \cdot \frac{\sum 1}{n} - 40361$$

jossa

b on siltakannen leveys

L on sillan kokonaispituus

$\sum 1$ on jännemittojen summa

ja n on sillan jänteiden lukumäärä

Pituusyksikkö on ' (feet)

Muina sillan kustannuksiin vaikuttavina tekijöinä mainitaan mm. siltakustannusten osuus koko urakkahinnasta, palkkivälin suhde sillan hyödylliseen leveyteen ja siltapaikan etäisyys Lontoosta.

Lähteessä /23/ esitetään kahdeksalle eri siltatyypille tilastolliset kustannusmallit. Mallin muoto on

$$C = k_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots$$

jossa muuttujina x_i voivat olla mm.

- sillan kokonaispituus
- sillan leveys
- $\frac{1}{\cos \varphi}$, kun φ on sillan vinous
- tukien korkeuksien summa (anturan yläpinnasta kannen alapintaan)
- jänteiden lukumäärä.

Esimerkkinä olkoon seuraava liittopalkkisillan kustannusmalli:

$$C(f) = 4960 \cdot b + 140690 \frac{1}{\cos \varphi} + 1790 \cdot L - 1410 \cdot \sum H - 211900 \quad (2.5)$$

jossa L on sillan kokonaispituus

$\sum H$ on tukien korkeuksien summa [m].

Paalutuskustannuksia ei ole huomioitu mallia laadittaessa. Mallin lähtöaineisto käsittää 19 siltaa. Kustannushajonta malliin verrattuna on n. 14 %.

Lähteessä /24/ tarkastellaan kustannusmallien käyttöä koko tieprojektin kannalta.

Suomalaisten laatta- ja kehäsiltojen kustannusmalleja on esitetty lähteessä /25/. Jatkuvien laattasiltojen malli ilman paalutuksia on

$$k \text{ (mk/m}^2\text{)} = 603,35 + 20,12 \cdot \frac{1000 \cdot n}{b \cdot l} + 66,99 \cdot h + 97,31 \cdot v + 131,06 \cdot t - 684,37 \cdot a + 193,23 \cdot a^2 \quad (2.6)$$

jossa

n on jänteiden lukumäärä

b·l on siltakannen ala

h on vesistösillassa Tsv-anturan alapinta
kuivassa sillassa alikulkukorkeus

v = 1 vesistösillassa
= 0 kuivassa sillassa

t = 1 TVL:n omissa töissä
= 0 urakkatöissä

a on kustannusalue (1,2 tai 3).

Mallin kertoimet vastaavat noin vuoden 70 kustannustasoa. Kertoimet on laskettu 76 sillan aineistosta, johon nähden mallin hajonta on noin 18 %.

Lähteissä /19/ ja /21/ siltojen kustannuksia tarkastellaan lähinnä työn suorituksen kannalta. Jälkimmäisessä esitetään eri siltatyyppeiden ainemenekkejä sekä työmääriä ja työkustannuksia sillan kansineliötä kohden.

Lähde /27/ sisältää viimeaikaisten TVH:n siltojen toteutuneet kustannukset. Niitä on tässä työssä käytetty lähtötietoina karkeiden kustannusmallien laatimiseen.

3. AINEMENEKKIMALLIT

3.1 Yleistä

Siltojen ainemenekkien kuvaamiseen käytetään tässä tutkimuksessa lineaarista regressiomallia. Mallin kertoimet määritetään pienimmän neliösumman menetelmällä, jolloin se kuvaa mahdollisimman hyvin valittua havaintojoukkoa. Valittu lineaarinen malli riittää varsin hyvin kuvaamaan myös funktioiden epälineaarista käyttäytymistä. Esim. muotoa

$$Q = k_1 + k_2 \frac{l^2}{h} + k_3 \frac{h}{b}$$

oleva malli on epälineaarinen kaikkien muuttujien l , b ja h suhteen. Kuitenkin sen kertoimet k_1 , k_2 ja k_3 voidaan ratkaista lineaarisen regressioanalyysin avulla.

Ollakseen luotettava regressiomallin tulee perustua riittävän suureen havaintomateriaaliin. Tämän lisäksi korrelaatiokertoimen täytyy olla mahdollisimman suuri. Samantyyppisten siltojen lukumäärä on kuitenkin varsin rajoitettu. Tästä syystä pelkkä tilastomatemattinen laskenta ei ole riittävä toimenpide ainemenekkimallin muodostamista ajatellen. Tämän lisäksi on erityistä huomiota kiinnitettävä seuraaviin seikkoihin:

- a) Mallin muoto on matemaattisesti oikea, esim. sillan rakennekorkeuden pienetessä pääterästen määrän tulee kasvaa.
- b) Regressioanalyysin tuloksena saadut mallin kertoimet ovat loogisia, vähintään oikean merkkisiä.

Mikäli laskettu malli on epälooginen, se on korjattava korrelaatiokertoimen suuruudesta välittämättä. Lähempi tarkastelu voi osoittaa jonkin lähtöarvon selvästi muista poikkeavaksi, jolloin se kannattaa poistaa havaintoaineistosta. Voi myös käydä niin, että epäyhtenäiseen havaintoaineistoon yritetään sovittaa liian tarkkaa mallia. Tällöin mallia on syytä yksinkertaistaa ja regressiolaskenta uusia.

Regressiomallien laskentaan on olemassa valmiita ohjelmia. Tässä tutkimuksessa on käytetty ohjelmaa, jonka regressiomallin yleinen muoto on

$$y = k_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3.$$

Aineiston homogeenisuutta on tutkittu varianssianalyysi-ohjelmalla. Sen avulla on esim. selvitetty, poikkeavatko aineiston laattapalkki- ja kotelosiltojen betonimäärät toisistaan.

3.2 Päällysrakenne

Päällysrakenteen perusmitoiksi valitaan "pituus", "leveys" ja "korkeus", jotka merkitään l , b ja h . Ne määritellään seuraavasti:

$$l = \frac{\sum l_i^2}{\sum l_i}, \text{ kun sillan jännemitat ovat } l_1, l_2 \dots l_i \dots l_n$$

b on sillan hyödyllinen leveys

h on päällysrakenteen rakennekorkeus

Jos sillan pääpalkit ovat viisteellisiä,

$$h = \frac{h_{\text{tuki}} + h_{\text{kenttä}}}{2}$$

Päällysrakenteen ainemenekit lasketaan tässä tutkimuksessa joko betonikuutioita kohti tai päällysrakenteen pinta-alaa kohti. Pinta-ala määritellään

$$A = b \times \sum l_i$$

kun b on sillan hyödyllinen leveys

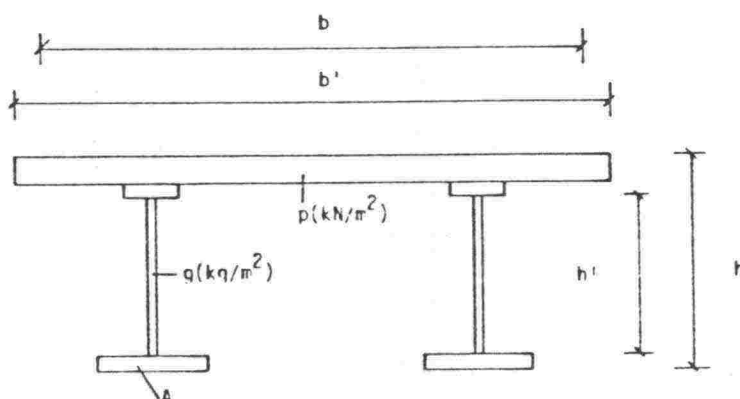
ja $\sum l_i$ on jännemittojen summa

Leveydeltään muuttuvissa silloissa käytetään kaavaa soveltaen. Mikäli sillan pääpalkit ovat ulokkeellisia, luetaan jännemittoihin l_i myös ulokkeiden pituudet.

3.21 Terässillat

Tarkastellaan aluksi sillan rakenneteräsmäärään vaikuttavia tekijöitä. Sillan idealisoitu poikkileikkaus on esitetty kuvassa 3.1. Johdetaan teräsmäärämallin periaatteellinen muoto. Suuruusluokkaa laskettaessa voidaan olettaa

$$b' = b \text{ ja } h' = h.$$



Kuva 3.1 Teräspalkkisillan idealisoitu poikkileikkaus

Siltaa kuormittakoon tasainen kuorma p , joka koostuu teräsrakenteen painosta, betonisen kansilaatan painosta ja päällysteiden painosta. Ajoneuvoliikenteen vaikutus on toisentyypinen, mutta ainakin suurimmissa silloissa sen vaikutus on pintakuormaa pienempi. Tarvittava alalaipan ala on

$$A = \frac{M}{h^2 \sigma_{sall}} \cdot \frac{k \cdot \frac{b}{2} \cdot p l^2}{h \cdot \sigma_{sall}} = \frac{k \cdot p}{\sigma_{sall}} \cdot \frac{b l^2}{2h}$$

$$\Rightarrow \text{laipan teräsmäärä/kansi-m}^2 = k_2 \frac{l^2}{h}$$

$$\text{Uuman teräsmäärä} = \frac{g h}{\frac{b}{2}} = k_3 \frac{h}{b}$$

Jos vielä oletetaan, että ylälaipan ala on verrannollinen sillan leveyteen, saadaan 2-palkkiselle sillalle seuraava teräsmäärämalli:

$$Q_{ss} \text{ (kg/m}^2\text{)} = k_1 + k_2 \frac{l^2}{h} + k_3 \frac{h}{b} \quad (3.1)$$

Tuntemattomat k-kertoimet määritetään siten, että malli sopii mahdollisimman hyvin havaintoaineistoon.

Rakenneteräksen lisäksi ainemenekkimallit määritetään betonille, betoniteräkselle ja muottipinta-alalle. Jos tarkastellaan vain 2-palkkisista siltoja, betonimäärään vaikuttaa lähinnä sillan hyödyllinen leveys. Sillan leveyden kasvaessa kansilaatan paksuus ja samalla kokonaisbetonimäärä kasvaa. Oletetaan riippuvuus lineaariseksi. Liittopalkkisillassa kansilaatta toimii myös pääkannattajan osana. Siihen tarvittava betonimäärä kasvaa samassa suhteessa kuin palkin alalaipan pinta-ala. Näin päädytään seuraavanmuotoiseen malliin:

$$Q_c \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)} = k_4 + k_5 \frac{l^2}{h} + k_6 \cdot b \quad (3.2)$$

Betoniteräsmäärä vaihtelee niin paljon, että sille on vaikeata löytää keskiarvoa parempaa mallia. Seuraavassa käytetään mallina suoraan keskiarvoa. Yksiköksi valitaan teräsmäärä betonikuutiota kohti (kg/m³).

Muottipinta-ala lasketaan kansineliötä kohti. Paras korrelaatio saadaan mallilla

$$Q_f \text{ (m}^2\text{/m}^2\text{)} = k_7 + k_8 \frac{1}{b}. \quad (3.3)$$

Malli on looginen, sillä b:n kasvaessa reunapalkkien muottipinta-alaa lisäävä vaikutus pienenee.

Kun edellä esitetyt mallit sovitetaan 2-palkkisten liittopalkkisiltojen havaintoaineistoon, ne saavat seuraavassa esitetyn muodon. Mallien lisäksi annetaan havaintoarvojen lukumäärä ja korrelaatiokertoimen neliö. Perusmuuttujien mittayksikkö on [m.]

$$Q_{ss} \text{ (kg/m}^2\text{)} = 24,3 + 0,0748 \cdot \frac{l^2}{h} + 272,0 \cdot \frac{h}{b} \quad (3.4)$$

20 kpl

$R^2 = 0,96$

$$Q_c \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)} = 0,216 + 0,000021 \cdot \frac{l^2}{h} + 0,0072 \cdot b \quad (3.5)$$

18 kpl $R^2 = 0,69$

$$Q_{rs} = 218 \text{ kg/m}^3 \quad (3.6)$$

$$Q_f \text{ (m}^2\text{/m}^2\text{)} = 0,96 + 2,20 \cdot \frac{1}{b} \quad (3.7)$$

18 kpl $R^2 = 0,74$

Mallien numeroarvot on laskettu taulukon 3.1 havaintoaineiston perusteella. Taulukkoon on kerätty viime vuosina rakennettujen jatkuvien teräspalkkisiltojen mittatietoja ja ainemenekkejä. Kivisalmen ja Korssundin siltojen betoni- ja muottimenekit on jätetty huomiotta mallien laskennassa. Niiden numeroarvot ovat keskimääräistä isompia, koska betonia on käytetty kansilaatan lisäksi vastapainona. Taulukon neljästä viimeisestä sarakkeesta selviää, miten hyvin johdetut mallit pystyvät kuvaamaan lähtöaineistoa. Niihin on merkitty suhdeluvut suunnitelman ainemenekki/mallin antama ainemenekki. Kohdat, joissa poikkeama malliin nähden on yli 10 %, on rengastettu. Viimeisen rivin variaatiokertoimet kuvaavat virheen suuruutta. Niistä todetaan, että betoniteräsmäärää lukuunottamatta mallit ovat selvästi tarkempia kuin pelkkä ainemenekkien keskiarvo. Esim. betonimäärän variaatio malliin nähden on ± 4 %, mutta keskiarvoon nähden ± 7 %.

Taulukko 3.1 2-palkkiset liittopalkkisillat, 20 kpl

SILTA	Y	l m	b m	h m	Q _{ss} kg/m ²	Q _c m ³ /m ²	Q _{rs} kg/m ³	Q _r m ² /m ²	r _{ss}	r _c	r _{rs}	r _f
Naamijoen	78	21,2	8,5	1,53	98,8	0,297	250	1,25	1,04	1,05	1,15	1,02
Sampilan	82	24,6	6,5	1,44	107,3	0,264	219	1,22	0,92	0,97	1,00	0,94
Visurin	81	25,7	10,5	1,72	104,3	0,300	253	1,06	1,07	1,03	1,16	0,94
Taininiemen	81	26,3	7,5	1,60	120,9	0,262	180	1,21	1,06	0,94	0,83	0,96
Hynnälänsalmen	78	27,8	8,5	1,29	122,3	0,274	210	1,13	1,11	0,94	0,96	0,93
Juutuanjoen	78	28,3	11	2,06	88,7	0,303	242	1,16	0,85	1,00	1,11	1,00
Saharannan	78	28,3	11,5	1,60	99,8	0,316	220	1,15	1,00	1,02	1,01	1,00
Varpuvirtain	80	30,4	6,5	1,38	129,5	0,282	224	1,36	0,98	1,02	1,03	1,05
Karesuvannon	80	32,6	9	1,67	130	0,304	225	1,13	1,06	1,03	1,03	0,94
Mourusalmen	78	33,3	7,5	1,65	130,2	0,285	188	1,38	0,97	1,00	0,86	1,10
Suomussalmen	79	41,0	7,5	2,06	169,3	0,279	280	1,19	1,06	0,97	1,28	0,35
Naarajoen	80	44,4	7	2,06	169,8	0,293	230	1,31	0,97	1,02	1,06	1,03
Ivalojoen	78	46,4	11,5	2,49	136,5	0,312	182	1,09	0,92	0,96	0,83	0,95
Inkeröisten	79	51,6	13	3,10	145,3	0,312	210	1,18	0,95	0,95	0,96	1,04
Väätämsalmen	79	52,3	8,5	2,90	178,8	0,320	166	1,21	0,95	1,07	0,76	1,00
Kivisalmen	79	53,5	7,5	2,03	201,6	0,378	186	1,40	0,99	1,26	0,85	1,12
Korssundin	81	53,5	7,5	3,16	199,7	0,390	184	1,27	0,97	1,35	0,84	1,01
Korian	83	54,0	13	3,23	165,7	0,341	272	1,21	1,04	1,04	1,25	1,03
Kaivannonsalmen	83	56,8	7,5	2,88	240	0,304	225	1,24	1,13	1,03	1,03	0,99
Kaitaisten	81	78,7	8,5	3,60	263,8	0,304	206	1,39	0,98	0,97	0,94	1,14
m		40,5	8,9	2,17	150,1	0,297	218	4,11	1,00	1,00	1,00	1,00
v		0,37	0,23	0,33	0,32	0,07	0,14	0,11	0,07	0,04	0,14	0,06

Taulukko 3.2 3-palkkiset liittopalkkisillat, 3 kpl

SILTA	Y	l m	b m	h m	Q _{ss} kg/m ²	Q _c m ³ /m ²	Q _{rs} kg/m ³	Q _r m ² /m ²	r _{ss}	r _c	r _{rs}	r _f
Äimäraution	82	43,7	15,25	2,09	178,6	0,317	205	1,12	1,37	0,92	0,94	1,01
Kuusarkosken	79	45,8	13,25	2,16	174,2	0,287	221	1,08	1,23	0,86	1,01	0,96
Pekkalän	83	55,9	15	2,46	196,6	0,315	217	1,11	1,20	0,90	1,00	1,00
m		48,5	14,5	2,24	183,1	0,306	214	3,60	1,27	0,89	0,98	0,99
v		0,13	0,08	0,09	0,06	0,05	0,04	0,04	0,07	0,03	0,04	0,03

Taulukkoon 3.2 on kerätty käytössä ollut jatkuvien 3-palkkisten liittopalkkisiltojen aineisto ja verrattu ainemenekkejä edellä esitettyjen mallien antamiin arvoihin. Vertailulukujen perusteella näyttäisi siltä, että 3-palkkisten siltojen teräsmenekki olisi n. 27 % suurempi kuin 2-palkkisten siltojen teräsmenekki. Tällainen johtopäätös on kuitenkin tilastomatemattisesti arveluttava. Syynä on 3-palkkisten siltojen leveyksien poikkeaminen 2-palkkisten siltojen leveyksistä. Virhetarkastelun yhteydessä osoitetaan, että kahden aineiston keskinäinen vertaaminen on sitä epäluotettavampaa mitä enemmän perusmittojen jakautumat poikkeavat toisistaan. Taulukon 3.2 arvoja voidaan sensijaan käyttää 3-palkkisen liittopalkkisillan ainemenekkien ennustamiseen. Sen mukaan esim. rakenneteräsmäärä on keskimäärin 1,27-kertainen kaavan (3.4) antamaan arvoon verrattuna. Ennusteen luotettavuus paranisi, jos taulukon havaintoarvojen lukumäärää voitaisiin lisätä.

Taulukkoon 3.3 on kerätty eräitä vanhempia jatkuvia teräspalkkisiltoja, jotka eivät ole liittorakenteisia. Ilmoitetuissa rakennekorkeuden arvoissa saattaa olla virheitä, koska taulukkoa laadittaessa ei niistä ollut tarkkaa tietoa. Viimeisessä sarakkeessa rakenneteräsmäärää verrataan mallin (3.4) antamiin arvoihin. Vertailulukujen perusteella ei voida tehdä kovin luotettavaa vertailua liittopalkkisillan teräsmääriin, koska rakennekorkeudet poikkeavat toisistaan merkitsevästi.

Taulukko 3.3 Ei-liittorakenteiset teräspalkkisillat,
10 + 4 + 3 kpl

SILTA	Y	l m	b m	h m	Q _{ss} kg/m ²	r _{ss}
2-palkkiset, 10 kpl						
Markkasuvannon	78	36,4	8,5	2,30	143,5	1,02
Pakurlan		37,2	10,5	2,4	120,6	0,93
Hiidenveden		38,1	10,5	2,4	121,6	0,92
Ahmaskosken		48,9	11	3,3	171,7	1,07
Keltin		50,8	12,5	3,5	158,9	1,02
Komminselän		52,1	10	2,9	174,8	1,01
Laukan		54,7	8,5	3,1	201,5	1,03
Lehtosalmen	79	60,5	8,5	4,03	256,3	1,16
Auvaaisbergin		64,7	12,5	3,8	184,3	0,97
Rungonsalmen		73,4	8,5	3,8	261,3	1,04
m		51,7	10,1	3,15	179,5	1,02
v		0,24	0,16	0,20	0,27	0,07
3-palkkiset, 4 kpl						
Espoonlahden		44,7	12,3	2,3	173,4	1,24
Särkänsalmen		46,6	14,5	2,5	171,1	1,26
Vaalankurkun		49,7	12,75	2,9	174,1	1,16
Pellon		50,4	9	3,2	205,6	1,14
m		47,9	12,1	2,7	181,1	1,20
v		0,06	0,19	0,15	0,09	0,05
4-palkkiset, 3 kpl						
Tiikkajansalmen		39,5	14	2,3	155,7	1,30
Tornionjoen	77	60,4	17,5	2,65	229,5	1,36
Mansikkakosken		61,7	21	3,0	216,9	1,37
m		53,9	17,5	2,65	200,7	1,35
v		0,23	0,20	0,13	0,20	0,03

3.22 Betoniset palkki- ja kotelosillat

Betonisilloissa kantavan poikkileikkauksen muodostaa lähinnä betoni. Senvuoksi on luonnollista käyttää betonimenekin kuvaamiseen samanmuotoista mallia kuin terässiltojen rakenneteräsmäärän kuvaamiseen. Tosin betonisissa palkkisilloissa ei ole varsinaista alalaippaa. Tästä huolimatta regressiolaskennat osoittavat mallin soveltuvan hyvin myös palkkisillan betonimäärän kuvaamiseen. Seuraavassa käytetäänkin sekä palkki- että kotelosilloille muotoa

$$Q_c \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)} = k_1 + k_2 \cdot \frac{l^2}{h} + k_3 \frac{h}{b} \quad (3.8)$$

olevaa betonimenekin mallia.

Jännitetettyjen siltojen jänneteräsmäärän kuvaamiseen kaava (3.8) on epälooginen, sillä rakennekorkeuden h kasvaessa ei jänneteräsmäärä saa kasvaa. Senvuoksi jätetään kaavan viimeinen termi pois ja korvataan se muotoa $\frac{1}{bh}$ olevalla termillä. Näin päädytään kaavaan

$$Q_{ps} \text{ (kg/m}^2\text{)} = k_4 + k_5 \frac{l^2}{h} + k_6 \frac{1}{bh} \quad (3.9)$$

Uusi termi kuvaa akselikuormien vaikutusta jänneteräsmäärään.

Jänneteräksen myötölujuudeksi oletetaan 180 N/mm^2 . Jos käytetyn teräksen lujuus poikkeaa tästä, niin tilastotietoja analysoitaessa jänneteräsmäärä kerrotaan suhteella

$$\frac{f_{yp}}{180} \cdot$$

Jännitetettyjen siltojen betoniteräsmäärän kuvaamiseen on vaikea löytää mallia, jonka korrelaatiokerroin olisi tarpeeksi hyvä. Siksi sen laatimisesta luovutaan ja korvataan se jänneteräksen ja betoniteräksen yhteismallilla. Sitä varten jänneteräsmäärä kerrotaan myötölujuuksien suhteella $\frac{180}{40} = 4,5$ ja näin saatu "ekvivalentti" teräsmäärä lisätään betoniteräsmäärään. Tämän kokonaisteräsmäärän kuvaamiseen valitaan samanmuotoinen malli kuin betonimäärän kuvaamiseen. Siis

$$4,5 Q_{ps} + Q_{rs} \text{ (kg/m}^2\text{)} = k_7 + k_8 \frac{l^2}{h} + k_9 \frac{h}{b} \quad (3.10)$$

Kokonaisteräsmäärän kuvaamiseen tämä malli on looginen, sillä viimeinen termi kuvaa nyt uuman haoitusta ja vaakateräksiä. Rakennekorkeuden kasvaessa uuman teräsmäärä kasvaa.

Sillan muottipinta-alaa kuvataan yksinkertaisella mallilla

$$Q_f \text{ (m}^2\text{/m}^2\text{)} = k_{10} + k_{11} \frac{h}{b} \quad (3.11)$$

Jännemittojen ei oleteta suoranaisesti vaikuttavan muottipinta-alaan. Sensijaan sillan rakennekorkeuden kasvaessa tai leveyden pienetessä muottipinta-ala kansineliötä kohti kasvaa. Valittujen ainemenekkikaavojen (3.8) - (3.11) kertoimet on määritetty taulukoissa 3.4 ja 3.8 esitetyn aineiston perusteella. Edellinen taulukko sisältää jännitettyjä jatkuvia palkkisiltoja ja jälkimmäinen jännitettyjä jatkuvia kotelosiltoja. Yliviivattuja lukuarvoja ei ole huomioitu, sillä ne eivät jostain syystä sovi muuhun aineistoon. Taulukon 3.8 yläosassa on neljä siltaa, joiden kotelo muodostuu kolmesta rinnakkaisesta kevennysputkesta. Tämä selittää niiden suuret r_c -arvot muihin siltoihin verrattuna.

Taulukoista 3.4 ja 3.8 laskettuja ainemenekkikaavoja on sovellettu myös muihin palkki- ja kotelosiltoihin. Laskennan kuluessa kävi ilmi, että palkkisiltojen betonimalli- ja kokonaisteräsmalli soveltuvat yhtä hyvin kotelosiltojen ainemenekkien arviointiin. Samoin kääntäen kotelosiltojen mallit soveltuvat myös palkkisiltoihin. Senvuoksi lopullisia regressiomalleja muodostettaessa ko. mallit laskettiin palkki- ja kotelosiltojen muodostamaa yhteistä aineistoa käyttäen. Jänneteräsmäärälle ja muottipinta-alalle laskettiin erilliset palkki- ja kotelosiltojen mallit.

Lopputuloksena saatiin seuraavat ainemenekkimallit:

$$Q_c \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)} = 0,411 + 0,000054 \cdot \frac{l^2}{h} + 0,834 \cdot \frac{h}{b} \quad (3.12)$$

35 kpl $R^2 = 0,66$

$$Q_{ps} \text{ palkit (kg/m}^2\text{)} = -1,73 + 0,02017 \cdot \frac{l^2}{h} + 5,37 \cdot \frac{1}{bh} \quad (3.13)$$

19 kpl $R^2 = 0,86$

$$Q_{ps} \text{ kotelot (kg/m}^2\text{)} = -2,56 + 0,02015 \cdot \frac{l^2}{h} + 4,18 \cdot \frac{1}{bh} \quad (3.14)$$

15 kpl $R^2 = 0,76$

$$4,5 Q_{ps} + Q_{rs} \text{ (kg/m}^2\text{)} = 91,3 + 0,1122 \cdot \frac{l^2}{h} + 46,4 \cdot \frac{h}{b} \quad (3.15)$$

39 kpl $R^2 = 0,54$

$$Q_f \text{ palkit } (m^2/m^2) = 1,146 + 4,18 \cdot \frac{h}{b} \quad (3.16)$$

$$19 \text{ kpl} \quad R^2 = 0,74$$

$$Q_f \text{ kotelot } (m^2/m^2) = 1,375 + 4,94 \cdot \frac{h}{b} \quad (3.17)$$

$$17 \text{ kpl} \quad R^2 = 0,70$$

Perusmittojen yksikkö on $[m]$

Regressiomallien laskennassa ei ole tyydytty pelkkään tilastolliseen analyysiin, vaan joitakin lähtöarvoja on jouduttu hylkäämään. Hylätty siltä on jossain suhteessa poikennut selvästi muista silloista tai sen mukaanotto olisi tehnyt mallin tavalla tai toisella epäloogiseksi. Hylätyt arvot on taulukoissa ylliviivattu.

Tutkitaan johdettujen kaavojen loogisuutta. Kaavan (3.12) mukaan betonisillan betonimäärä on vähintään $0,41 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Tämä on peruspaksuus, joka kasvaa jännemitan kasvaessa ja sillan kaventuessa. Viimeinen termi kuvaa palkkien uumien betonimäärää. Sen mukaan lisäkorkeus Δh aiheuttaa $0,83 \cdot \Delta h$ -suuruisen lisäyksen siltapoikkileikkauksen betonialaan. 2-palkkisessa sillassa tämä vastaisi palkkileveyttä $0,42 \text{ m}$. Ainakin jännitetyille silloille suuruusluokka on oikea.

Jänneteräskaavat (3.13) ja (3.14) poikkeavat muista sikäli, että niiden vakiotermi on negatiivinen. Tämä tarkoittaa sitä, että jännemitan ollessa tarpeeksi pieni jänneteräsmäärä $= 0$. Tämä on luonnollista, sillä sillan perusterästäys hoidetaan betoniteräksillä. Kaavojen viimeisten termien mukaan sillan leveys vaikuttaa palkkisillan jänneteräsmäärään enemmän kuin kotelosillan jänneteräsmäärään.

Kaavan (3.16) mukaan lisäkorkeus Δh aiheuttaa palkkisillan muottipinta-alan lisäyksen $4,18 \cdot \Delta h \text{ (m}^2/\text{m}^2)$. 2-palkkiselle pitkälle sillalle teoreettinen arvo on $4 \cdot \Delta h$. Ylitys aiheutuu poikkipalkeista ja sillan päistä. Kaavan (3.17) suurempi kerroin johtuu siitä, että osa perusaineiston kotelo-silloista on useampi-uumaisia.

Taulukko 3.4

Jännitetyt jatkuvat palkkisillat, 20 kpl

SILTA	Y	l	b	h	Q _c	Q _{ps}	4,5Q _{ps}	Q _{rs}	Q _f	r _c	r _{ps}	r _{prs}	r _f
		m	m	m	m ³ /m ²	kg/m ²	kg/m ²	m ² /m ²					
Biskopsön	84	25,5	8,5	1,45	0,480	12,4	120	1,87	0,83	0,67	0,86	1,01	
Voltin	80	25,5	10,5	1,47	0,527	15,6	146	1,70	0,96	0,97	0,99	0,98	
Taininiemen	80	26,3	7,5	1,45	0,538	21,6	160	1,96	0,90	1,03	1,04	1,00	
Hynnälänsalmen	77	27,8	8,5	1,33	0,545	21,9	161	1,75	0,95	0,94	0,98	0,97	
Ahkiolahden	81	28,1	8,5	1,60	0,628	21,0	175	1,95	1,06	1,09	1,13	1,01	
Härkälän	77	28,2	13	1,60	0,597	18,2	164	1,71	1,11	1,17	1,07	1,03	
Juutuanjoen	78	28,3	11	1,85	0,584	14,8	148	1,74	1,02	1,02	1,00	0,94	
Könkään	77	28,9	8	1,67	0,597	22,3	182	2,11	0,98	1,11	1,16	1,05	
Veckjärven	81	29,2	13	2,18	0,532	9,4	113	1,80	0,93	0,80	0,79	0,97	
Martin	75	31,6	8	1,60	0,612	26,7	212	2,09	1,00	1,11	1,24	1,05	
Ruukinkosken	81	31,7	11,75	1,81	0,599	13,9	156	1,80	1,05	0,80	0,97	1,01	
Mourusalmen	77	33,3	7,5	1,65	0,615	23,3	174	2,01	0,98	0,89	0,98	0,97	
Sipoonlahden	76	33,5	12,5	2,50	0,630	14,0	119	1,86	1,05	1,07	0,79	0,94	
Kuokkalan	78	34	10,5	1,90	0,675	22,5	153	2,01	1,14	1,14	0,91	1,06	
Bölen	82	35	13	2,60	0,586	12,4	130	1,97	0,97	0,93	0,85	0,99	
Kautun	81	36,1	11,5	1,87	0,592	21,4	174	1,75	1,01	1,00	0,98	0,96	
Markkasuvannon	78	36,4	8,5	2,00	0,657	20,4	156	2,08	1,02	0,88	0,88	0,98	
Halikon	78	37,1	13	2,10	0,580	18,0	146	1,90	1,00	0,96	0,85	1,04	
Keikyän	80	48,4	12	2,40	0,677	29,0	215	2,06	1,07	1,08	1,02	1,04	
Kivisalmen	81	53,5	7,5	3,08	0,807	28,4	220	2,64	1,00	0,96	1,03	0,92	
m		32,9	10,2	1,91	0,609	19,7	163	1,90	1,01	1,00	0,98	1,00	
v		0,22	0,21	0,24	0,11	0,27	0,18	0,07	0,06	0,11	0,12	0,04	

Taulukko 3.5

Jännitetyt ulokepalkkisillat, 5 kpl

SILTA	Y	l	b	h	Q _c	Q _{ps}	^{4,5Q_{ps}} Q _{rs}	Q _f	r _c	r _{ps}	r _{prs}	r _f
		m	m	m	m ³ /m ²	kg/m ²	kg/m ²	m ² /m ²				
Ämmänmyllyn	80	25,5	6,5	1,5	0,694	16,4	147	2,71	1,11	0,78	0,98	1,28
Huopanankosken	83	35	7,5	1,7	0,869	24,7	243	2,35	1,36	0,90	1,33	1,12
Kortosalmen	82	38	7,5	1,72	0,707	21,7	175	2,37	1,09	0,70	0,89	1,13
Korkeasaarensalmen	82	38	7,5	1,95	0,854	24,1	200	2,49	1,28	0,89	1,07	1,12
Kellosalmen	82	38	7,5	2,12	0,854	24,1	200	2,49	1,25	0,97	1,11	1,07
m		34,9	7,3	1,80	0,796	22,2	193	2,48	1,22	0,85	1,08	1,14
v		0,16	0,06	0,13	0,11	0,15	0,18	0,06	0,09	0,13	0,15	0,07

Taulukko 3.6

Jännitetyt 1-aukkoiset palkkisillat, 7 kpl

SILTA	Y	l m	b m	h m	Q _c m ³ /m ²	Q _{ps} kg/m ²	4,5Q _{ps} +Q _{rs} kg/m ²	Q _f m ² /m ²	r _c	r _{ps}	r _{prs}	r _f
Halmeen B	77	24,7	7	1,2	0,805	26,6	175	1,53	1,39	1,09	1,12	0,82
Halmeen A	77	26	13	1,2	0,722	24,1	178	1,60	1,39	1,30	1,12	1,04
Ala-Termeksen	77	28	6,5	1,71	0,753	22,5	172	2,32	1,15	1,07	1,11	1,03
Keneskosken	75	28,1	7,5	1,85	0,632	19,5	176	2,29	0,99	1,10	1,17	1,05
Forsbyn	75	30	7,5	1,8	0,733	22,6	177	2,44	1,15	1,11	1,12	1,14
Virtalan	77	35	13	2,2	0,741	18,1	153	2,21	1,27	1,13	0,95	1,19
Sonkakosken	75	36,5	7,5	2,33	0,756	25,1	198	2,74	1,08	1,19	1,17	1,12
m		29,8	8,9	1,76	0,735	22,6	176	2,16	1,20	1,14	1,11	1,06
v		0,15	0,32	0,25	0,07	0,13	0,07	0,20	0,13	0,07	0,07	0,11

Taulukko 3.7

Teräsbetoniset palkkisillat, 11 kpl

SILTA	Y	l m	b m	h m	Q _c m ³ /m ²	Q _{rs} kg/m ²	Q _f m ² /m ²	r _c	r _{rs}	r _f	Huom.
Mattilan	83	16,3	14,5	1,36	0,682	92	1,44	1,37	0,78	0,94	1-aukkoinen
Häkiven	72	16,6	14	1,1	0,647	109	1,44	1,32	0,89	0,98	
Pyssyharjun	76	19,3	10,5	1,3	0,599	139	1,77	1,13	1,03	1,06	
Sukuran	77	20,8	10,5	1,38	0,508	137	1,73	0,95	1,03	1,02	
Suukosken	76	21	7,5	1,97	0,762	97	2,38	1,19	0,75	1,06	
Naamijoen	78	21,2	8,5	1,6	0,700	137	1,91	1,20	1,04	0,99	
Iso-Koskelan	75	21,3	15	1,4	0,780	98	1,56	1,54	0,74	1,02	
Ohkolanlaakson	75	21,7	15	2,0	0,611	112	1,64	1,14	0,90	0,96	
Renkomäen	77	21,8	13	1,3	0,678	117	1,58	1,32	0,85	1,01	
Halisten	81	22,6	13	2,18	0,763	119	1,95	1,36	0,95	1,06	
Suokannaksen	76	26	11	1,57	0,712	185	1,81	1,29	1,27	1,04	
m		20,8	12,1	1,56	0,677	122	1,75	1,25	0,94	1,01	
v		0,13	0,22	0,22	0,12	0,22	0,16	0,12	0,17	0,04	

Taulukko 3.8

Jännitetyt jatkuvat kotelosillat, 20 kpl

SILTA	Y	l	b	h	Q _c	Q _{ps}	4,5Q _{ps} +Q _{rs}	Q _r	r _c	r _{ps}	r _{prs}	r _f
		m	m	m	m ³ /m ²	kg/m ²	kg/m ²	m ² /m ²				
Pernajanharjun	82	21,5	8,5	1,25	0,813	11,7	161	1,80	1,47	0,88	(1,15)	(0,86)
Mossabergetin	82	25,2	13	1,30	0,691	16,5	150	1,75	1,33	1,22	1,00	0,94
Kaunismaen	76	26,4	10,5	1,50	0,565	13,6	149	1,99	1,02	0,98	0,99	0,96
Koskenkylän	82	26,9	10,5	1,30	0,716	18,4	168	1,99	1,32	1,09	1,05	1,00
Karjarannan	83	28,9	10,5	1,35	0,735	17,1	149	1,99	1,33	0,93	(0,89)	0,99
Eteläntien	75	29,6	10,5	1,23	0,503	18,9	170	1,75	0,92	(0,88)	0,96	0,90
Tourulan	75	29,6	12	1,45	0,548	19,7	194	2,09	1,01	(1,18)	(1,18)	1,06
Marjalan	76	31,2	10,5	1,70	0,555	13,2	159	2,46	0,96	(0,81)	0,98	(1,13)
Haapalahden	75	31,7	7	1,60	0,591	20,1	194	2,35	0,93	0,92	1,13	0,94
Hopeaseppien	83	33,6	14	1,65	0,593	16,9	170	2,01	1,09	0,98	0,98	1,03
Hirvikosken	83	36,0	8,5	1,73	0,566	27,0	209	2,21	0,91	(1,19)	(1,13)	0,93
Savilahden	81	36,1	12,4	1,90	0,533	16,0	162		0,93	0,91	0,92	
Vaajakosken	75	36,5	11	1,55	0,564	22,2	200	2,31	0,98	0,94	1,03	(1,12)
Vierumäen	77	38,4	8,5	1,59	0,643	25,5	172	2,24	1,04	0,91	(0,84)	0,97
Kiuralan	79	39,7	8,5	2,23	0,745	25,0	188	3,36	(1,12)	(1,22)	1,03	1,24
Tervonsalmen	76	40,9	11	1,95	0,577	20,3	171	2,29	0,95	(0,89)	(0,87)	1,02
Harjavallan	83	42,5	14,5	2,00	0,550	33,7	232	2,40	0,96	1,55	(1,17)	(1,17)
Hevosluodon	83	42,8	10,5	2,37	0,710	22,9	210	2,38	1,11	(1,13)	1,11	0,96
Vaaluvirran	76	45,5	6,5	2,10	0,713	32,7	218	3,11	0,97	1,05	1,01	1,05
Luotsinmäen	82	48,6	10,5	2,75	0,616	22,1	178	2,62	0,91	1,01	(0,89)	0,76
m		34,6	10,5	1,73	0,598	21,1	180	2,18	0,99	1,00	1,02	1,00
v		0,21	0,20	0,24	0,12	0,25	0,13	0,15	0,07	0,13	0,10	0,08

Taulukko 3.9

Ulokkeelliset jännitetyt kotelosillat, 5 kpl

SILTA	Y	l	b	h	Q _c	Q _{ps}	4,5Q _{ps} +Q _{rs}	Q _r	r _c	r _{ps}	r _{prs}	r _f
		m	m	m	m ³ /m ²	kg/m ²	kg/m ²	m ² /m ²				
Jokisaaren	79	32	8,5	1,50	0,762	25,0	196	2,15	1,28	1,15	1,11	0,96
Hirvensalmen	76	32	10,5	1,85	0,654	13,6	163	2,22	(1,11)	(0,88)	1,01	0,99
Billnäsin	79	32	13,5	1,63	0,597	16,2	144	1,82	(1,09)	1,00	(0,86)	0,92
Rönninsalmen	79	38	7,5	1,63	1,022	33,7	236	2,82	(1,60)	(1,19)	(1,18)	(1,15)
Dagsmarkin	80	40	10,5	1,85	0,810	24,0	205	2,32	1,34	1,02	1,04	1,03
m		34,8	10,1	1,69	0,769	22,5	189	2,27	1,28	1,05	1,04	1,01
v		0,11	0,23	0,09	0,21	0,35	0,19	0,16	0,16	0,12	0,11	0,09

Taulukko 3.10

Teräsbetoniset kotelosillat, 7 kpl

SILTA	Y	l	b	h	Q _c	Q _{rs}	Q _r	r _c	r _{rs}	r _f	Huom.
		m	m	m	m ³ /m ²	kg/m ²	m ² /m ²				
Tuunaansalmen	73	17,5	10,5	1,26	0,577	82,9	1,88	1,10	(0,67)	0,96	
Vahravuoren	76	22,3	10,5	1,58	0,546	155	2,16	(0,93)	(1,16)	1,02	
Jyskän	72	25,0	9,75	1,47	0,614	123	2,07	1,10	(0,84)	0,98	
Keihäskosken	74	25,4	6	1,80	0,782	181	2,41	1,15	(1,25)	(0,84)	1-aukkoinen
Haagan	72	27,1	14,25	1,45	0,653	168	2,25	1,25	(1,10)	(1,20)	3-uumainen
Ollikkalan	75	28,1	13	1,66	0,707	161	2,29	(1,30)	1,07	1,14	-"
Vähähaaran	73	30,7	13	1,95	0,653	134	2,60	1,16	(0,88)	(0,23)	-"
m		25,2	11,0	1,60	0,647	144	2,24	1,15	0,99	1,05	
v		0,17	0,25	0,15	0,12	0,23	0,10	0,09	0,21	0,13	

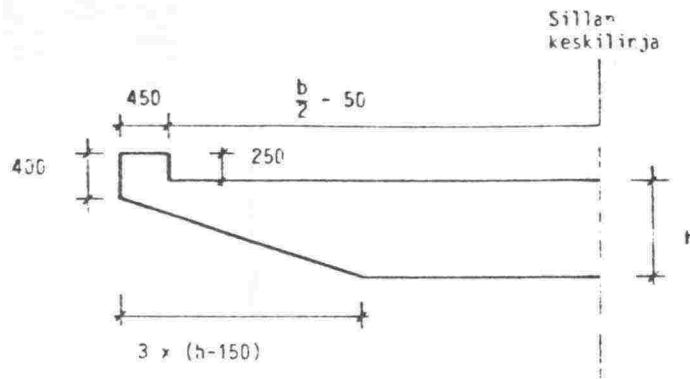
Taulukoissa 3.4 ja 3.8 on esitetty lähtöaineiston lisäksi kunkin sillan ainemenekit suhteessa mallin antamaan arvoon. Nämä vertailuarvot on merkitty r-kirjaimella. Niiden keskiarvoista m ja variaatiokertoimista v voidaan tehdä johtopäätöksiä mallien sopivuudesta ja niiden avulla voidaan verrata eri siltatyypin ainemenekkejä keskenään. Vertailun luotettavuus edellyttää kuitenkin, että verrattavien ryhmien perusmittojen keskiarvot ovat lähellä toisiaan. Vertaamalla toisiinsa taulukoiden r_c ja r_{prs} -arvojen keskiarvoja todetaan yhteismallit perustelluiksi. Betonimäärät poikkeavat yhteisestä keskiarvosta vain prosentin verran. Kokonaisteräsmäärissä poikkeama on 2 %. Täälläkin erolla ei ole mitään tilastomatemattista merkitystä. Variaatiokertoimet ovat betonimäärien suhteen noin 6 % ja kokonaisteräsmäärien suhteen noin 11 %. Jänneteräsmäärissä variaatiokerroin on keskimäärin 12 % ja muottimäärissä 4...8 %. Kaikkien suureiden kohdalla mallin käyttö pienentää selvästi variaatiokerrointa verrattuna siihen, että ainemenekki ennustettaisiin suoraan keskiarvon perusteella.

Taulukoissa 3.5 ja 3.6 jatkuvien palkkisiltojen ainemenekkimalleja on sovellettu kaksitukisiin jännitettyihin palkkisiltoihin ja taulukossa 3.7 teräsbetonisiin palkkisiltoihin. Taulukoissa 3.9 ja 3.10 on vastaavasti kotelosiltojen malleja sovellettu kaksitukisiin jännitettyihin koteloihin ja teräsbetonikoteloihin. Niiden mukaan kaksitukisten jännitettyjen siltien betonimäärä on selvästi mallin antamaa arvoa suurempi, mutta teräsmäärissä ei ole kovin suurta eroa. Sama huomio pätee myös teräsbetonisiltoihin. On mielenkiintoista todeta, että jännitettyjen siltien kokonaisteräsmäärää kuvaava kaava $4,5 Q_{ps} + Q_{rs}$ soveltuu sellaisenaan teräsbetonisiltien betoniteräsmäärän arvioimiseen. Teräsbetonisilla palkkisilloilla keskimääräinen virhe on 6 % ja teräsbetonisilla kotelosilloilla vain 1 %. Variaatiokerroin on suurempi kuin jännitettyjen siltien teräsmäärissä.

3.23 Betoniset laattasillat

Tarkastellaan kuvassa 3.2 esitettyä laattasillan poikkileikkausta. Tämä poikkileikkaustyyppi on tiesilloissa yleisesti käytössä. Siinä laatan reuna on viistetty kaltevuuteen 1:3 pohjatasoon nähden. Oletetaan reunapalkin yläpinnan olevan 250 mm ajoradan betonipintaa ylempänä ja reunapalkin mitat oletetaan kuvan 3.2 mukaisiksi. Silloin voidaan pitkän sillan betonimäärälle ja muottipinta-alalle johtaa teoreettiset ainemenekkien kaavat seuraavasti:

$$C_c = \frac{A_c}{b} = \frac{2}{b} \cdot \left[\left(\frac{b}{2} + 0,4 \right) \cdot h + 0,25 \cdot 0,45 - \frac{3}{2} \cdot (h - 0,15)^2 \right]$$



Kuva 3.2 Laattasillan oletettu poikkileikkaus

$$Q_c \text{ (m}^2\text{/m}^2\text{)} = h + 0,1575 \cdot \frac{1}{b} + 1,7 \cdot \frac{h}{b} - 3,0 \cdot \frac{h^2}{b} . \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} Q_f &= \frac{p}{2} = \frac{2}{b} \left[0,25 + 0,4 + \left(\frac{b}{2} + 0,4 - 3h + 0,45 \right) + \sqrt{(h-0,15)^2 + 9(h-0,15)^2} \right] \\ &= \frac{2}{b} \left[1,50 + \frac{b}{2} - 3h + \sqrt{10} \cdot (h-0,15) \right] \\ &= 1 + (3 - 0,3 \cdot \sqrt{10}) \cdot \frac{1}{b} + (2\sqrt{10} - 6) \cdot \frac{h}{b} . \end{aligned}$$

Likiarvokaavaksi muunnettuna saadaan

$$Q_f \text{ (m}^2\text{/m}^2\text{)} = 1 + 2,051 \cdot \frac{1}{b} + 0,325 \cdot \frac{h}{b} \quad (3.19)$$

Käytännössä reunapalkin yläpinnan korkeusasema vaihtelee päällysteiden paksuuden mukaan. Myös varsinaisen betonilaatan paksuus voi vaihdella sillan poikkisuunnassa. Kun vielä huomioidaan sillan päiden vaikutus, voidaan todeta, että käytännössä ainemenekit poikkeavat jonkin verran näistä teoreettisista arvoista. Poikkeama on sitä suurempi mitä lyhyemmästä sillasta on kysymys.

Laattasillan teräsmäärälle ei voida johtaa samanlaista teoreettista mallia kuin betonimäärälle ja muottipinta-alalle. Samoilla perusteilla kuin palkkisilloissa voidaan kuitenkin päätellä teräsmääräkaavan tyyppi seuraavaksi:

$$Q_{rs} \text{ (kg/m}^2\text{)} = k_1 + k_2 l^2 + k_3 \frac{1}{bh} \quad (3.20)$$

Tämä eroaa jänneteräsmäärän kaavasta (3.9) vain keskimmäisen termin osalta, joka kuvaa rakenteen oman painon vaikutusta. Ehdotettuun kaavaan (3.20) päädytään olettamalla laattasilan oma paino verrannolliseksi laatan paksuuteen h .

Laattasiltojen aineisto jaetaan tässä tutkimuksessa kolmeen ryhmään taulukoiden 3.11, 3.12 ja 3.13 mukaan. Ensimmäinen taulukko sisältää jatkuvat massiivilaatat, joiden reunaviiste on kaltevuudessa 1:3 laatan alapintaan nähden. Ryhmään kuuluu myös siltoja, joiden kanteen liittyy siipimuureja. Nämä lisäävät lähinnä betonimäärää ja muottipinta-alaa teoreettisiin arvoihin verrattuna.

Toisen ryhmän (taulukko 3.12) muodostavat kevennetyt laattasilat. Keventäminen on saatu aikaan joko reuna-aulokkeiden tai kevennysputkien avulla. Kolmas ryhmä (taulukko 3.13) sisältää sekä viisteellä 1:3 että 1:1 tehtyjä ulokelaattoja. Poikkileikkauksen muoto vaikuttaa vain sillan betonimäärään. Jyrkempi reunaviiste lisää sillan betonimäärää samankorkuiseen normaalipoikkileikkaukseen verrattuna.

Kun kaava (3.20) sovitetaan taulukoiden 3.11, 3.12 ja 3.13 aineistoihin, päädytään seuraaviin teräsmäärämalleihin:

Jatkuvat laattasilat, normaalipoikkileikkaus

$$Q_{rs} \text{ (kg/m}^2\text{)} = 67,1 + 0,133 \cdot l^2 + 2,68 \cdot \frac{1}{bh} \quad (3.21)$$

34 kpl $R^2 = 0,28$

Jatkuvat laattasilat, kevennetty poikkileikkaus

$$Q_{rs} \text{ (kg/m}^2\text{)} = 50,8 + 0,108 \cdot l^2 + 9,86 \cdot \frac{1}{bh} \quad (3.22)$$

16 kpl $R^2 = 0,47$

Ulokelaattasilat

$$Q_{rs} \text{ (kg/m}^2\text{)} = 82,1 + 0,135 \cdot l^2 + 0,85 \cdot \frac{1}{bh} \quad (3.23)$$

23 kpl $R^2 = 0,48$

Kaavojen vakiotermi sisältää pääosan laatan raudoituksesta. Termien etumerkit ovat oikeat, sillä teräsmäärä kasvaa jännemitan kasvaessa tai rakennekorkeuden pienetessä. Myös sillan kaventuessa kansineliötä kohti laskettu teräsmäärä kasvaa. Termien keskinäistä suuruutta verrattaessa huomio kiinnittyy viimeisen termin pieneen merkitykseen. Vain kevennetyssä poikkileikkauksessa sillan leveydellä ja rakennekorkeudella on käytännön merkitystä.

Kaavojen (3.21)...(3.23) keskinäinen vertailu osoittaa, että ulokelaattasillan teräsmäärä on suurin, sitten jatkuvan massiivilaatan ja kevennetyn laattasillan teräsmäärä on pienin.

Taulukoissa 3.11...3.13 on teräsmäärien lisäksi ilmoitettu suhteelliset betoni- ja muottimäärät (r_c ja r_f) teoreettisiin kaavoihin (3.18) ja (3.19) verrattuna. Muottimäärät ja massiivilaattojen betonimäärät ovat yleensä teoreettista arvoa suurempia. Tämä johtuu sillan päiden vaikutuksesta. Lyhyissä ulokelaattasilloissa lisäys teoreettiseen arvoon verrattuna on suurempi kuin jatkuvissa laattasilloissa. Kevennetyissä laattasilloissa betonimäärä on pienempi mutta muottimäärä suurempi kuin keventämättömissä laattasilloissa.

r -arvojen variaatiokertoimista todetaan, että se on betonimäärälle n. 6...16 %, teräsmäärälle n. 13 % ja muottipinta-alalle n. 8 %. Nämä ovat jonkin verran pienemmät kuin suoraan ainemenekkien keskiarvojen suhteen lasketut variaatiokertoimet.

Taulukko 3.11

Jatkuvat laattasillat, normaalipoikkileikkaus, 36 kpl

SILTA	Y	l	b	h	Q _c	Q _{rs}	Q _f	r _c	r _{rs}	r _f
		m	m	m	m ³ /m ²	kg/m ²	m ² /m ²			
Hietaman	79	11,0	8,5	0,73	0,713	115	1,36	1,01	1,31	1,07
Laaksotien	77	11,3	13,0	0,75	0,855	81	1,41	1,17	0,91	1,20
Kallion	79	12,0	7,5	0,63	0,663	85	1,29	1,04	0,91	0,99
Sarankulman	82	12,6	20,7	0,83	0,864	93	1,19	1,07	1,03	1,07
Hevossaaren	77	12,8	15	0,80	0,799	72	1,28	1,03	0,78	1,11
"	77	12,8	13	0,80	0,791	80	1,29	1,03	0,87	1,10
Kuckubergetin	82	13,6	4,5	0,81	0,825	89	1,49	1,16	0,87	0,98
Vanhakylän	82	13,8	8,5	0,90	0,824	115	1,34	1,01	1,18	1,05
Muuntajatehtaan	81	13,8	13,5	0,74	0,761	116	1,25	1,05	1,21	1,07
Oriveden	81	13,9	18,45	0,85	0,820	87	1,26	1,00	0,91	1,12
Toljan	82	14,0	4,5	0,75	0,844	110	1,79	1,22	1,05	1,19
Naurissalmen		14,3	7,1	0,90	0,912	115	1,48	1,15	1,15	1,11
Kortesbackenin	82	14,5	12,5	0,90	0,875	117	1,35	1,04	1,19	1,14
Huutoniemen	81	14,5	13	0,81	0,794	78	1,22	1,02	0,79	1,04
Pepparsin	82	14,6	4,5	0,86	0,768	104	1,56	1,06	0,98	1,03
Ristiinantien	82	14,6	10,5	0,80	0,837	104		1,10	1,04	
Pilvenmäen	77	14,6	10,5	0,95	0,896	109	1,41	1,04	1,10	1,15
Lehtoniemen	78	14,8	13	0,90	0,858	102	1,29	1,02	1,02	1,09
Hinkuan	82	14,9	7,5	0,98	0,872	97	1,39	1,04	0,95	1,06
Kaikulan	77	15,1	10,5	0,95	0,912	120	1,35	1,06	1,18	1,10
Laanin	83	15,1	14,0	1,04	0,954	114	1,17	1,01	1,14	1,00
Kehon	81	15,2	12,75	0,80	0,790	85	1,36	1,03	0,83	1,15
Simunan		15,6	17	0,90	0,835	98	1,18	0,98	0,96	1,04
Pitkänmäen	79	16,0	10,5	0,95	0,868	117	1,24	1,01	1,11	1,01
Stormoran	83	16,2	10,5	1,10	0,990	105	1,43	1,05	0,99	1,16
Vanhan Sataman	79	16,3	13	0,95	0,895	129	1,22	1,02	1,22	1,03
Palokan	81	16,6	11,75	1,00	0,892	89	1,37	0,99	0,83	1,14
Littoisten	80	16,6	12	1,00	0,928	95	1,21	1,03	0,88	1,01
Högforsin	76	17,4	10,5	1,10	1,025	93	1,51	1,08	0,83	1,23
Vesivalon	82	17,6	15,0	0,90	0,939	100	1,34	1,10	0,89	1,16
Tikkurilan	79	17,8	10,75	1,00	0,872	87	1,37	0,98	0,76	1,12
Ritan	82	18,0	13	0,85	0,843	120	1,39	1,05	1,05	1,18
Vanhankirkon	79	18,1	12	1,09	1,003	141	1,19	1,04	1,23	0,99
Uudenkyläntien	83	18,4	6,5	1,00	0,972	120	1,63	1,18	1,00	1,19
Jukolan	81	19,1	13,5	1,15	1,003	120	1,24	0,99	1,01	1,05
Myllykylän	76	20,1	13,75	1,10	0,999	110	1,17	1,02	0,88	1,00
m		15,2	11,5	0,90	0,869	102	1,34	1,05	1,00	1,09
v		0,14	0,32	0,14	0,10	0,16	0,10	0,06	0,14	0,06

Taulukko 3.12 Jatkuvat laattasillat, kevennetty poikkileikkaus, 16 kpl

SILTA	Y	l	b	h	Q _c	Q _{rs}	Q _f	r _c	r _{rs}	r _f
		m	m	m	m ³ /m ²	kg/m ²	m ² /m ²			
Hulmin	74	11,0	7,5	0,70	0,611	69	1,62	0,89	0,82	1,24
Svinösundin	74	14,0	12,25	0,90	0,699	86	1,35	0,83	1,02	1,13
Nummikadun	79	14,0	12,25	0,98	0,680	82	1,12	0,76	0,98	0,94
Kaupunginkallion	80	18,3	16,0	0,90	0,792	101	1,25	0,93	1,02	1,09
Ojoisen	82	18,6	13,25	1,05	0,878	121	1,34	0,93	1,20	1,14
Ojaniemen	84	18,7	14,0	1,27	0,632	85	1,26	0,58	0,86	1,07
Madesalmen	78	19,0	7,5	1,10	0,955	113	1,57	1,08	1,01	1,19
Jaalanganlahden	81	19,0	10,5	1,10	0,898	104	1,40	0,95	0,98	1,14
Haagan	72	19,8	14,35	1,00	0,624	119	1,29	0,68	1,12	1,11
Kujalan	79	20,1	13,25	1,35	0,873	123	1,47	0,78	1,17	1,24
Kymijärven	79	20,6	12,0	1,25	0,909	104	1,40	0,87	0,95	1,16
Mansikkaniemen	83	20,9	10,5	1,25	0,918	114	1,57	0,90	1,00	1,27
Jovin	80	21,6	9,75	1,10	0,972	147	1,31	1,04	1,22	1,05
Kinnarin	79	22,0	10,5	1,11	0,963	126	1,67	1,03	1,04	1,36
Toholahden	78	22,0	10,75	1,25	0,782	93	1,42	0,76	0,78	1,16
Juthbackan	84	24,1	12,5	1,37	0,838	107	1,31	0,71	0,84	1,09
m		19,0	11,7	1,11	0,814	106	1,40	0,86	1,00	1,15
v		0,18	0,20	0,16	0,16	0,19	0,11	0,16	0,13	0,09

Taulukko 3.13 Ulokelaattasillat, 23 kpl

SILTA	Y	l	b	h	Q _c	Q _{rs}	Q _f	r _c	r _{rs}	r _f
		m	m	m	m ³ /m ²	kg/m ²	m ² /m ²			
Kannusillan	80	12,0	9,0	0,76	0,778	114	1,65	1,07	1,11	1,31
Murron	77	12,0	13,5	0,69	0,782	107	1,60	1,15	1,04	1,37
Nyängenin	82	12,7	13,75	0,75	0,833	114	1,61	1,14	1,09	1,38
Laanin	83	15,0	7,0	0,80	0,851	112	1,52	1,15	0,98	1,14
Ykskorvan	78	15,5	9,0	0,88	0,950	128	1,73	1,18	1,10	1,37
Bosundin	78	15,8	10,0	1,00	0,934	96	1,39	1,05	0,82	0,12
Toivion	82	16,0	16,75	0,85	0,857	108	1,56	1,05	0,92	1,37
Nukarin	81	16,3	7,5	0,80	0,923	151	1,70	1,24	1,25	1,30
Oksakosken	76	16,5	8,5	0,90	0,973	128	1,50	1,20	1,06	1,18
Hienkosken	78	17,0	7,0	0,90	0,965	109	1,81	1,22	0,88	1,36
Kongasjoen	82	17,5	10,5	0,90	0,897	120	1,30	1,08	0,96	1,06
Peipohjan	78	17,5	10,5	0,95	0,910	116	1,54	1,06	0,93	1,26
Suolttijoen	79	18,0	7,5	1,05	1,128	104	1,79	1,30	0,81	1,36
Kangasmäen	81	18,0	10,5	1,00	0,982	148	1,68	1,10	1,16	1,37
Vison	79	18,0	10,5	0,90	0,835	113	1,47	1,01	0,89	1,20
Hindersbron	82	18,0	10,5	0,90	0,902	113	1,51	1,09	0,89	1,23
Lenmen	82	18,0	10,75	1,05	1,030	129	1,50	1,12	1,01	1,23
Salon	78	20,0	8,5	1,00	1,051	129	1,70	1,21	0,93	1,33
Sara-Ahon	82	20,0	10,5	1,10	1,102	163	1,50	1,16	1,18	1,22
Ojantakasen	81	20,0	10,75	0,95	0,916	135	1,40	1,06	0,98	1,15
Aijalan	80	21,1	7,5	1,05	1,238	127	1,60	1,43	0,88	1,21
Ahvenlammen	82	22,0	11,0	1,00	0,953	161	1,40	1,06	1,08	1,15
Ruhan	78	24,0	6,5	1,20	1,247	176	1,88	1,43	1,08	1,37
m		17,4	9,9	0,93	0,958	126	1,58	1,15	1,00	1,26
v		0,17	0,25	0,13	0,13	0,17	0,09	0,10	0,12	0,08

3.24 Vertailu ulkomaiseen aineistoon

Tämän kappaleen taulukoissa on esitetty joukko kirjallisuudesta poimittuja ulkomaisten siltojen ainemenekkejä. Aineistoa on liittopalkkisilloista sekä jännitetyistä palkki- ja kotelosilloista. Kustakin sillasta on taulukoon merkitty painotettu jännemitta l, hyödyllinen leveys b ja rakennekorkeus h. Nämä on laskettu tässä selvityksessä omaksutun käytännön mukaan. Yleensä ulkomaisessa aineistossa annetaan leveystietona vain siltakannen kokonaisleveys. Taulukoissa annettu hyödyllinen leveys b on saatu vähentämällä ilmoitetusta kokonaisleveydestä 1 m. Näin on sillan leveys saatu suomalaisen käytännön mukaiseksi. Ainemenekkitiedot on muunnettu vastaamaan uutta leveyden lukuarvoa. Lopuksi taulukoissa on annettu suhdeluvut r, jotka tarkoittavat sillan ainemenekin suhdetta vastaavan ainemenekkimallin antamaan arvoon. Taulukoiden keskiarvoriveillä on käytetty tähti (*)-merkintöjä ilmoittamaan poikkeamista suomalaisesta vertailuaineistosta. Jos luvun perässä on yksi tähti, poikkeama on melkein merkitsevä. Jos tähtiä on kaksi, poikkeama on tilastollisesti merkitsevä.

Liittopalkkisiltoja on esitetty taulukoissa 3.14 ja 3.15. Ne on jaoteltu pääpalkkien lukumäärän mukaisiin ryhmiin: 2-palkkiset, 3-palkkiset ja 4-palkkiset sillat. Poikkeavuuksia laskettaessa 2-palkkisten siltojen aineistoa on verrattu taulukon 3.1 2-palkkisiin liittopalkkisiltoihin ja 3- ja 4-palkkisten siltojen aineistoa taulukon 3.2 3-palkkisiin liittopalkkisiltoihin. Suhdelukujen r_{ss} keskiarvoista nähdään, että referoitujen siltojen teräsmenekit noudattelevat yleensä suomalaisten siltojen teräsmenekkejä. Taulukon 3.14 2-palkkisten siltojen teräsmenekit ovat keskimäärin hyvin lähellä mallin antamaa arvoa. Hajonta (0,25) tosin on huomattavasti suurempi kuin suomalaisessa aineistossa (0,07).

Taulukko 3.14 Liittopalkkisiltoja. Lähde /6/, taulukko 2.22

Silta n:o		l m	b m	h m	Q _{ss} kg/m ²	r _{ss}
2-palkkiset, 12 kpl						
38	DDR	23,4	9,5	1,9	125	1,25
3	Sveitsi	34	6,8	1,65	115	0,81
15		35,1	8,1	2,3	112	0,79
37	DDR	42,4	8,5	1,8	174	1,11
39	DDR	45,9	10,1	2,0	181	1,15
34	DDR	46,3	11,4	3,2	237	1,57
10		57,1	8,7	3,1	211	1,06
40		58,3	12,4	3,7	147	0,84
18		59	11,9	3,1	119	0,66
20		73	8,3	3,7	226	0,89
1		84,9	10	6,2	230	0,82
14		111	10,5	5,7	325	0,97
	m	55,9*	9,7	3,2*	183	0,99
	v	0,44	0,17	0,46	0,35	0,25
3-palkkiset, 3 kpl						
33	Ranska	37,1	9	2	221	1,62
11		37,5	13	1,75	110	0,91
7		40	10,1	2,5	202	1,45
	m	38,2*	10,7*	2,1	178	1,33
	v	0,04	0,19	0,18	0,33	0,28
4-palkkiset, 9 kpl						
35	DDR	30	10,3	1,6	162	1,49
36	DDR	38,4	12,7	2,3	183	1,51
23	DDR	38,4	13,1	2,2	152	1,27
12	BRD	39,3	23,2	2,25	119	1,17
13	BRD	51,6	24	3,6	223	1,85
22		53,3	28,5	3,3	130	1,08
6	BRD	72	24,6	3,3	139	0,78
5	BRD	81,1	25	3,0	252	1,14
2	BRD	103,8	19,8	4,1	399	1,44
	m	56,4	20,1	2,8	195	1,30
	v	0,43	0,32	0,28	0,45	0,24

Taulukko 3.15

Voest-Alpine:n rakentamia liittopalkkisiltoja.
Lähde /15/.

2-palkkiset, 7 kpl	l m	b m	h m	Q _{ss} kg/m ²	r _{ss}	Huom.
Kleinreifling, Austria	43,3	7,2	2,4	165	0,95	1-aukkoinen
Soul-Pusan, Korea	48,3	8,7	2,9	204	1,16	
Right Tailrace, Nigeria	53,6	8,7	3,0	255	1,34	
Mösslerbrücke, Austria	57	10	2,9	219	1,17	
Draubücke, Austria	57,1	8,7	2,9	198	0,99	
Left Tailrace, Nigeria	85,7	8,7	4,9	373	1,29	1-aukkoinen
Endacher, Austria	105	11,2	5,8	306	1,00	
m	64,3**	9,0	3,6**	246**	1,13**	
v	0,35	0,14	0,36	0,29	0,14	
4-palkkiset, 5 kpl						
Falima, Sierra Leone	24,7	7,8	2,2	143	1,17	2 palkkia + vinosauvat
Sewa, Sierra Leone	38,6	8,7	3,1	189	1,20	
Mainz, Germany	46,6	27,5	2,2	183	1,53	
Lueq, Austria	67,1	20	4,3	198	1,23	
Altersberg, Austria	77,6	24,5	4,1	199	1,11	
m	50,9	17,7	3,2	182	1,25	
v	0,42	0,51	0,32	0,13	0,13	

Taulukon 3.15 2-palkkisten siltojen teräsmäärät ovat keskimäärin 13 % mallin antamaa arvoa suuremmat. Ero suomalaiseseen aineistoon on merkitsevä. Tämän perusteella on kuitenkin varottava tekemästä johtopäätöksiä, koska taulukon ulkomaisten siltojen jännemitat ja samalla myös rakennekorkeudet poikkeavat merkitsevästi vastaavista suomalaisten siltojen arvoista. 4-palkkisten siltojen teräsmenkit eivät keskiarvoltaan poikkea suomalaisten 3-palkkisten siltojen teräsmenekeistä.

Taulukoihin 3.16, 3.17 ja 3.18 on kerätty erään jännitettyjä kotelosilloja käsittelevän tutkimuksen aineistoa. Mukaan on otettu ne 2-uumaiset kotelosillat, joista lähteessä on ilmoitettu teräsmenекkejä. Tutkimus on sikäli puutteellinen, että raportissa ei ole ilmoitettu käytetyn jänneteräksen lujuusarvoja. Senvuoksi teräsmenекkeihin on suhtauduttava kriittisesti. Lisäksi suurin osa aineiston silloista on jännitetty myös sillan poikkisuunnassa. Tämä lisää jänneteräsmäärää malliin verrattuna, sillä malli antaa vain sillan pituussuuntaisen jänneteräsmäärän. Muunnettuun kokonaisteräsmäärään ($4,5 \cdot Q_{ps} + Q_{rs}$) poikittaisen jännittämisen ei pitäisi vaikuttaa.

Taulukko 3.16 Ranskalaisia jännitettyjä kotelosilloja,
11 kpl. Lähde /14/.

Silta	l m	b m	h m	$Q_{ps}^{4,5}$ kg/m ²	$Q_{ps}+Q_{rs}$ kg/m ²	r_{ps}	r_{prs}
91	43,8	15	2,1	25,6	141	1,18	0,70
106	49,2	16,8	2,5	33,9	181	1,55	0,88
113	57,9	18,4	2,9	24,3	129	0,96	0,57
116	66,6	13,8	2,9	37,5	187	1,06	0,69
118	63,9	9,6	3,0	22,1	149	0,65	0,58
119	69,8	14,8	3,1	33,1	175	0,93	0,63
124	64,5	18,4	3,3	31,6	163	1,16	0,68
128	67,3	13,7	3,1	41,9	221	1,25	0,83
129	69,3	9,6	3,5	26,5	153	0,79	0,59
151	79,2	19,2	3,5	44,2	244	1,15	0,81
153	88,3	14,8	4,1	37,4	198	0,89	0,62
m	65,4**	14,9**	3,1**	32,6**	176	1,05	0,69**
v	0,19	0,22	0,17	0,22	0,20	0,23	0,16

Taulukko 3.17 Englantilaisia jännitettyjä kotelosilloja,
6 kpl. Lähde /14/.

Silta	l m	b m	h m	$Q_{ps}^{4,5}$ kg/m ²	$Q_{ps}+Q_{rs}$ kg/m ²	r_{ps}	r_{prs}
52	27,7	16,4	1,37	29,7	155	2,14	0,98
122	53,6	17,3	2,9	46,5	319	2,13	1,52
142	61,5	13,1	3,6	35,5	239	1,48	1,08
147	65,0	21	3,4	50,3	-	1,91	-
170	105,4	19,8	6,6	68,3	483	1,97	1,63
172	120,3	16	6,5	115,8	-	2,46	-
m	72,2**	17,3**	4,1**	57,7**	299**	2,02**	1,30**
v	0,48	0,16	0,51	0,55	0,47	0,16	0,25

Taulukko 3.18 Muiden maiden jännitettyjä kotelosilloja,
7 kpl. Lähde /14/.

Silta	l m	b m	h m	Q_{ps} kg/m ²	$4,5 Q_{ps} + Q_{rs}$ kg/m ²	r_{ps}	r_{prs}	Maa
67	30	13	1,7	18,3	-	1,33	-	Itävalta
96	50	8,1	1,65	53,9	320	1,24	1,18	Tsekkoslovakia
109	51,4	22,2	2,2	23,0	175	0,88	0,76	Ruotsi
112	64,3	10	3,35	27,5	-	0,91	-	Kanada
156	76,7	13,8	4,7	59	308	2,14	1,24	Ruotsi
158	98,6	12	3,9	26	-	0,46	-	Sveitsi
165	93,1	17,9	5,5	63,3	343	1,91	1,21	Ruotsi
m	66,3**	13,9*	3,3**	38,7**	287**	1,27	1,10	
v	0,37	0,35	0,46	0,49	0,26	0,47	0,21	

Taulukoiden 3.16-3.18 numeroarvoja tarkastellessa kiinnittyy huomio siihen, että jokaisen taulukon sillat ovat merkitsevästi isompia kuin ainemenekkimallien pohjana olevat suomalaiset sillat. Toisaalta taulukoiden aineistot eivät poikkea toisistaan siten, että sillä olisi tilastollista merkitsevyyttä. Taulukoiden keskinäinen vertailu pitäisi tämän perusteella olla mahdollista.

Taulukoiden suhteellisia ainemenekkiarvoja verrattaessa todetaan, että aineiston ranskalaisten siltojen teräsmenekki on huomattavasti pienempi kuin englantilaisten siltojen teräsmenekki. Esim. kokonaisteräsmenekin r_{prs} keskiarvo on ranskalaisissa silloissa 0,69 ja englantilaisissa 1,30. Ero saattaa osaksi selittyä jänneteräslaatuojen erolla, mutta se ei voi selittää koko eroa. Muiden maiden sillat asettuvat teräsmenekin suhteen edellisten väliin r_{prs} :n keskiarvon ollessa 1,10. Yhteenvetona voitaneen tehdä varovainen johtopäätös: ranskalaisten siltojen teräsmenekki on pienempi, englantilaisten suurempi kuin suomalaisten siltojen teräsmenekki.

Kolmeen viimeiseen taulukkoon 3.19-3.21 on kerätty saksalaisten jännitettyjen siltojen ainemenekkejä. Taulukon 3.19 pohjana oleva aineisto on vanhempaa kuin kahden muun taulukon aineisto. Siinä on esitetty vain sillan mittatietojen ja ainemenekkiarvojen keskiarvot ja variaatiokertoimet. Aineiston jänneteräsmenekit on muutettu vastaamaan myötölujuudeltaan 180 MN/m² teräksen menekkiä. Poikittain jännitetyissä silloissa on Q_{ps} -arvoa laskettaessa huomioitu vain sillan pituussuuntaiset jänneteräksset, joten lukuarvojen pitäisi olla vertailukelpoisia suomalaisten siltojen vastaavien arvojen kanssa.

Taulukoiden numeroarvoista todetaan, että kokonaisteräsmäärää kuvaava suhdeluku r_{prs} on taulukon 3.19 kotelosiltoja lukuunottamatta lähellä ykköstä. Ts. kehitetty teräsmäärämalli antaa keskimäärin oikean tuloksen myös saksalaisille silloille, vaikka ne ovatkin yleensä mallin pohjana käytettyjä suomalaisia siltoja isompia. Muiden suhdelukujen suhteen todetaan, että sekä betonimenekki että jänneteräsmenekki ovat mallien antamia arvoja suurempia. Tästä voidaan tehdä se johtopäätös, että aineiston saksalaisissa silloissa on enemmän betonia ja jänneterästä, mutta vähemmän betoniterästä kuin suomalaisille silloille lasketut mallit edellyttäisivät.

Taulukko 3.19 Yhteenveto lähteen /5/ jännitetyistä betonisilloista

	l	b	h	Q_c	Q_{ps}	4,5 $Q_{ps}+Q_{rs}$	r_c	r_{ps}	r_{prs}
	m	m	m	m^3/m^2	kg/m^2	kg/m^2			
2-palkkisiltoja, 21 kpl									
m	31,4	13,3**	2,0	0,61	18,0	156	1,07	1,16*	1,00
v	0,24	0,25	0,44	0,16	0,27	0,21	0,15	0,29	0,22
2-uumaisia kotelosiltoja, 15 kpl									
m	45,4*	12,4*	2,8**	0,68	21,6	175	1,07*	1,19	0,92*
v	0,45	0,19	0,42	0,17	0,50	0,34	0,09	0,29	0,12

Taulukko 3.20 Jännitettyjä 2-palkkisiltoja, 11 kpl. Lähde /7/.

Silta	l m	b m	h m	Q_c m^3/m^2	$Q_{ps}^{4,5}$ kg/m^2	$Q_{ps}+Q_{rs}$ kg/m^2	r_c	r_{ps}	r_{prs}
86	23,7	8,8	1,0	0,540	22,3	161	1,01	0,93	1,01
87	21,5	15,8	1,17	0,720	19,1	162	1,46	1,53	1,17
90	23,7	19,3	1,35	0,672	13,8	145	1,37	1,20	1,03
91	21,9	10,8	1,0	0,760	20,3	183	1,48	1,08	1,23
130	51,9	17,2	3,45	0,930	32,0	227	1,50	1,71	1,21
133	18,7	13,9	1,06	0,564	14,5	149	1,15	1,24	1,13
155	36,6	10,8	2,1	0,607	21,8	173	1,00	1,10	1,01
156	50,5	13,5	2,05	0,587	34,2	235	0,97	1,03	0,99
157	32,3	11,6	1,9	0,558	21,3	158	0,97	1,24	0,98
159	22,9	11,8	1,6	0,525	16,3	129	0,97	1,43	0,96
187	35,3	13,6	1,3	0,589	23,2	177	1,09	0,82	0,87
m	30,8	13,4**	1,64	0,641	21,7	173	1,18**	1,21**	1,05
v	0,38	0,23	0,45	0,19	0,30	0,19	0,19	0,22	0,11

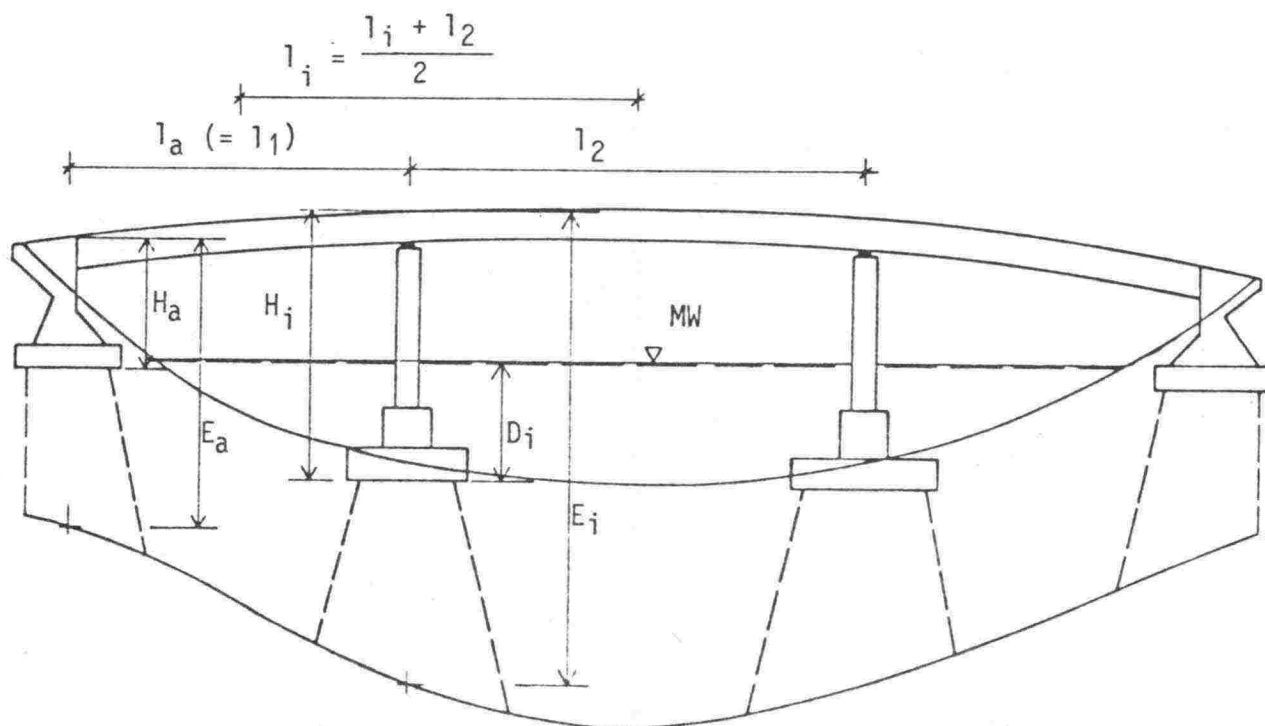
Taulukko 3.21 Jännitettyjä 2-uumaisia kotelosiltoja, 18 kpl. Lähde /7/.

Silta	l m	b m	h m	Q_c m^3/m^2	$Q_{ps}^{4,5}$ kg/m^2	$Q_{ps}+Q_{rs}$ kg/m^2	r_c	r_{ps}	r_{prs}
80	35,5	10,3	1,7	0,738	21,1	174	1,25	1,01	0,96
81	80	13,5	3,4	0,759	38,9	253	1,05	0,91	0,81
82	55	10,3	2,75	0,796	29,4	196	1,15	1,06	0,86
83	34,8	11,8	1,8	0,651	21,9	183	1,13	1,23	1,05
127	52,6	13,8	3,0	0,757	26,1	234	1,18	1,22	1,14
128	42,5	13,2	2,1	0,716	29,2	223	1,21	1,38	1,14
129a	23,1	11,3	1,2	0,722	23,1	180	1,38	1,71	1,23
129d	23,1	10,4	1,2	0,680	23,2	169	1,28	1,64	1,15
154	38,5	12,5	1,9	0,725	21,8	209	1,25	1,09	1,13
171	46,3	9,3	2,0	0,630	23,9	180	0,97	0,81	0,81
172	45,7	13,3	2,5	0,774	24,2	198	1,26	1,21	1,02
176	70,9	12,2	3,3	0,682	37,0	250	0,95	1,04	0,91
177	30,0	13,3	1,8	0,714	14,5	202	1,30	1,14	1,32
178	54,1	13,3	2,9	0,737	25,1	196	1,14	1,06	0,91
179	59,5	22,8	3,5	0,733	21,2	161	1,24	1,01	0,76
183	53,1	13,4	4,0	0,695	14,0	126	1,00	0,89	0,68
184	49,8	13,8	3,7	0,729	19,4	192	1,09	1,29	1,07
185	45,2	13,5	3,0	0,575	31,3	218	0,91	1,98	1,23
m	46,6**	12,9**	2,5**	0,712**	24,7	197	1,15**	1,20*	1,01
m	0,32	0,22	0,34	0,08	0,27	0,16	0,12	0,25	0,18

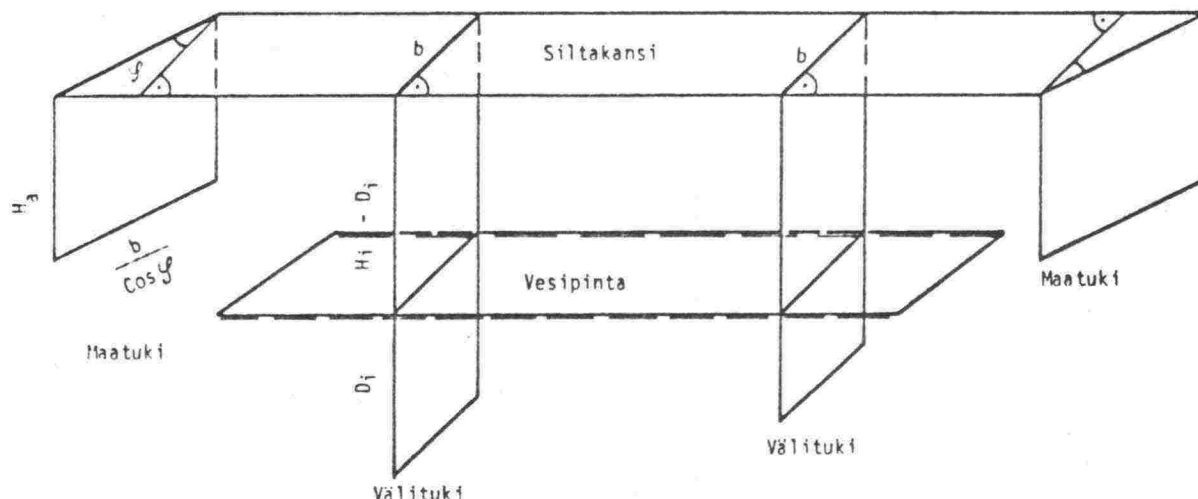
3.3 Alusrakenteet

Sillan alusrakenteiden ainemenekkeihin vaikuttavat lähinnä tukien korkeudet ja sillan leveys. Sen vuoksi on luonnollista tarkastella ajatellun tukiseinän pinta-alayksikköä kohti tulevaa ainemenekkiä. Tuot oletetaan kuvan 3.4 mukaisesti levymäisiksi rakenteiksi. Tuen betonimenekki (m^3/m^2) on silloin tuen tai sen osan keskimääräinen paksuus. Paalutetun tuen paalumäärä ilmoitetaan tukilevyn leveysyksikköä kohti (kpl/m). Paalujen koko on $300 \times 300 \text{ mm}^2$.

Ainemenekkikaavojen muuttujiksi valitaan tukilevyn leveys ja korkeus sekä reunajänteen pituus tai välituen viereisten jännemittojen keskiarvo (kuva 3.3). Regressiomalli valitaan mahdollisimman yksinkertaiseksi. Näin päädytään tuen perusmittojen suhteen lineaariseen malliin.



Kuva 3.3 Sillan tukien mittojen määrittely



Kuva 3.4 Sillan kaaviokuva

3.31 Maatuet

Maatuen ainemenekkimallit ovat muotoa

$$Q = k_1 + k_2 \cdot \frac{b}{\cos \varphi} + k_3 \cdot l_a + k_4 \cdot H_a \quad (3.24)$$

Alaindeksi a viittaa maatukeen (abutment).

b on sillan hyödyllinen leveys ja φ sillan pään vinous. Tällöin $\frac{b}{\cos \varphi}$ on vinon tukilevyn leveys kuvan 3.4 mukaisesti. l_a on reunajänteen pituus ja H_a maatuen korkeus kuvan 3.3 mukaisesti. Tuntemattomat kertoimet k_i määritetään regressioanalyysin avulla.

Lähtöaineistona käytetään taulukoita 3.22 ja 3.23. Tarkempi analyysi osoittaa, ettei ole mitään syytä käsitellä betoni- ja terässilloja erikseen, vaan mainitut taulukot voidaan käsitellä yhtenäisenä aineistona. Tämä onkin luonnollista, koska maatuen pääkuormat ovat anturan päällä oleva maa ja takaosaan vaikuttava maanpaine. Siltakannen tukireaktiolla ei ole kovin suurta merkitystä.

Regressiolaskenta antaa maatuen betonimäärälle ja paalumäärälle seuraavat ainemenekkikaavat:

$$Q_c (\text{m}^3/\text{m}^2) = 1,252 - 0,0398 \cdot \frac{b}{\cos \varphi} + 0,0146 \cdot l_a + 0,1064 \cdot H_a \quad (3.25)$$

39 kpl $R^2 = 0,31$

$$n_p (\text{kpl}/\text{m}) = 1,52 - 0,110 \cdot \frac{b}{\cos \varphi} + 0,035 \cdot l_a + 0,266 \cdot H_a \quad (3.26)$$

29 kpl $R^2 = 0,49$

Taulukko 3.22

Terässiltojen maatuot, 22 kpl

SILTA	Y	b	γ	l_a	H_a	Q_c	Q_{rs}	Q_r	η_p	r_c	r_{rs}	r_r	r_p
		m	o	m	m	m ³ /m ²	kg/m ³	m ² /m ³	kpl/m				
Kolarinsaaren		4,5		32,0	4,1	2,52	64	1,96	3,11	(1,27)	(1,37)	(1,10)	0,95
Tennistöjen		4,5		33,5	5,8	2,68	28	1,61		(1,23)	(0,60)	0,91	
Törmälän		6,5		23,5	3,7	1,19	30	1,24	2,77	(0,69)	(0,64)	(0,70)	1,05
Lainijoen		6,5		29,5	4,1	1,10	58	1,46	1,85	(0,59)	(1,24)	(0,82)	(0,63)
Ruottalan		6,5		33,5	6,3	1,90	33	1,82		(0,88)	(0,7)	1,02	
Koirakosken		6,5		33,5	6,5	2,24	46	1,84		1,03	0,98	1,04	
Naarajoen		7,0		37,5	5,0	2,14	44	1,75	3,47	1,04	(0,94)	0,99	(1,03)
Hylkirannan		7,5		23,0	5,0	1,81	47	1,50	3,20	0,99	1,01	(0,84)	(1,13)
Haarajoen		7,5		27,5	5,2	2,10	62	1,73	3,20	(1,10)	(1,33)	0,97	1,05
Mourusalmen	78	7,5		28,0	5,2	2,03	38	2,05	3,20	1,06	(0,81)	(1,15)	1,05
Vaulamin		7,5		29,5	4,7	0,94	40	1,42	2,40	(0,50)	(0,86)	(0,80)	(0,81)
Suomussalmen	79	7,5		32,0	5,3	2,14	56	1,85	2,67	1,08	(1,20)	1,04	(0,83)
Horkanvirran		7,5		33,4	5,4	2,00	43	1,78	2,27	0,99	(0,92)	1,00	(0,63)
Korssundin	81	7,5		34,0	5,9	2,31	44	1,99	4,13	(1,11)	(0,94)	(1,12)	(1,20)
Pajarin		7,5		37,4	7,4	2,25	49	1,78	4,93	0,98	1,05	1,00	(1,24)
Kaivannonsalmen	83	7,5		38,0	6,3	2,25	63	1,83	4,00	1,03	(1,35)	1,03	1,08
Visurin	81	10,5	18	23,4	4,8	2,19	51	1,74	2,35	(1,31)	1,09	0,98	0,98
Saharannan	78	11,5		26,0	8,0	1,85	56	2,02	3,22	0,91	(1,20)	(1,14)	0,98
Ivalojoen	78	11,5		42,3	8,0	2,57	85	1,64	4,09	(1,14)	(1,82)	0,92	1,06
Annalan		12,0		45,0	7,2	1,97	50	1,87	3,75	0,90	1,07	1,05	1,02
Tornionjoen	77	17,5		54,0	6,0				2,74				(0,89)
Pekkalän	83	17,8		37,0	9,3	1,95	57	1,52		0,94	(1,22)	(0,84)	
m		8,6		33,3	5,9	2,01	50	1,73	3,19	0,99	1,06	0,98	0,98
v		0,41		0,22	0,24	0,23	0,27	0,12	0,25	0,21	0,27	0,12	0,16

Taulukko 3.23

Betonisiltojen seinämäiset maatuot, 21 kpl

SILTA	Y	b	γ	l_a	H_a	Q_c	Q_{rs}	Q_r	η_p	r_c	r_{rs}	r_r	r_p
		m	o	m	m	m ³ /m ²	kg/m ³	m ² /m ³	kpl/m				
Keihäskosken		6,0	15	25,4	7,7	1,86	27	2,00		(0,85)	(0,58)	1,13	
Ala-Temoksen	77	6,5		28,0	7,5	2,11	58	2,07		0,96	(1,24)	(1,17)	
Halmeen B	77	7,0	21	24,7	6,9	1,76	43	2,34	3,33	(0,86)	0,92	(1,32)	0,98
Suukosken	76	7,5		21,0	6,4	2,08	31	1,89		1,07	(0,66)	1,06	
Mourusalmen	77	7,5		28,0	5,2	2,08	37	2,06	3,47	1,09	(0,79)	(1,16)	1,14
Keneskosken	75	7,5	15	28,1	6,0	2,23	39	1,80		(1,12)	0,83	1,01	
Forsbyn	75	7,5	27	30,0	6,8	2,04	44	1,48		0,98	0,94	(0,83)	
Kivisalmen	81	7,5		34,0	6,0				3,33				0,96
Sonkakosken	75	7,5	30	36,5	7,4	2,39	45	1,82		1,07	0,96	1,02	
Kaamasjoen		7,5		37,0	7,1	2,07	43	2,02		0,92	0,92	(1,14)	
Könkään	77	8,0		26,4	5,7	1,84	36	1,85		0,96	(0,77)	1,04	
Naamijoen	78	8,5	23	20,2	7,4	2,08	37	1,73		1,06	(0,79)	0,97	
Ahkiolahden	81	8,5	15	25,6	3,9	1,91	47	1,89	3,18	(1,13)	1,01	1,06	(1,28)
Hirvikosken	83	8,5		32,0	4,9	2,21	49	1,77		(1,16)	(1,05)	1,00	
Kaunisjärven	76	10,5		19,0	8,7				2,38				(0,71)
Ruukinkosken	81	11,7	25	29,0	6,1	1,68	46	1,41	2,24	0,93	0,98	(0,79)	(0,82)
Keikyän	80	12,0		45,0	6,5				4,17				(1,19)
Halmeen A	77	13,0	28	26,0	6,0	1,48	36	1,79	2,17	(0,88)	(0,77)	1,01	(0,90)
Virtalan	77	13,0	37	34,9	8,8	2,02	39	1,56	2,89	0,98	0,83	(0,86)	(0,86)
Salamavuoren	79	13,7	18	15,4	4,0	1,19	75	1,61	1,59	(0,89)	(1,60)	(0,9)	1,03
Mattilan	83	14,5	16	14,0	6,6	2,03			3,12	(1,30)			(1,46)
m		9,2		27,6	6,5	1,95	43	1,83	2,90	1,01	0,92	1,03	1,04
v		0,28		0,27	0,20	0,15	0,25	0,13	0,25	0,12	0,25	0,13	0,22

Taulukoihin on laskettu vertailuarvot r_c ja r_p , jotka tarkoittavat sillan maatuen ainemenekkejä mallien antamiin arvoihin verrattuna. Sarakkeiden keskiarvoista nähdään, että betoni- ja terässiltojen vertailuluvut poikkeavat toisistaan vain muutaman prosentin. Erolla ei ole tilastollista merkitystä, joten yhteismallin käyttö on perusteltua. Ainemenekkien hajonta malleihin verrattuna on noin 20 %.

Maatukien teräsmäärien ja muottipinta-alojen vaihtelu on melko epämääräistä. Niille ei ole löydetty matemaattista mallia, jonka korrelaatiokerroin olisi tilastomatemattisesti merkitsevä. Senvuoksi on tyydyttävä keskiarvoihin. Kun tarkastellaan betonikuutiota kohti laskettua teräsmäärää ja muottipinta-alaa, ne on kustannusarviota tehtäessä helppo sisällyttää betonikuution hintaan. Taulukoiden 3.22 ja 3.23 keskiarvoiksi saadaan

$$Q_{rs} = 47 \text{ kg/m}^3 \quad (3.27)$$

$$Q_f = 1,77 \text{ m}^2/\text{m}^3 \quad (3.28)$$

Jalalliset maatuudet on lueteltu omassa taulukossaan (taulukko 3.24). Niiden mitat poikkeavat siksi paljon seinämäisten maatukien mitoista, että ryhmien keskinäinen vertailu on hyvin epäluotettavaa. Näyttää kuitenkin siltä, että jalallisen maatuen betonimäärä on noin 60 % mallin (3.25) antamasta arvosta. Teräsmäärien keskiarvo on 68 kg/m^3 ja muottipinta-alojen keskiarvo $2,00 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Taulukko 3.24 Betonisiltojen jalalliset maatuudet, 8 kpl

SILTA	Y	b m	φ o	l_a m	H_a m	Q_c m^3/m^2	Q_{rs} kg/m^3	Q_f m^2/m^3	n_p kpl/m	r_c	r_{rs}	r_f	r_p
Martin	75	8,0		28,8	9,5	2,39	43			0,01	0,63		
Pitkänmäen	79	10,5		15,3	7,5	1,17	62	1,87		0,63	0,91	0,95	
Juutuanjoen	78	11,0		20,0	8,4	1,19	29	1,78		0,57	0,42	0,89	
Vanhan Sataman	79	13,0	30	12,0	7,6	0,58	77	2,56		0,35	1,13	1,28	
Kalisten	81	13,0		19,0	10,0	1,22	88	1,75		0,59	1,29	0,87	
Mossabergetin	82	13,0		22,0	6,8	1,15	96	1,51	3,23	0,65	1,4	0,6	1,24
Muuntajatehtaan	81	13,5	29	12,6	4,7	0,96	75	2,16		0,73	1,10	1,08	
Simunan		17,0		14,0	7,2	0,75	76	2,39		0,48	1,11	1,19	
m		12,4		18,7	7,7	1,18	68	2,00		0,63	1,00	1,00	
v		0,21		0,34	0,21	0,46	0,33	0,19		0,31	0,33	0,19	

3.32 Välituet

Vesistö sillan välituen oletetaan muodostuvan kahdesta osasta kuvan 3.4 mukaisesti. Vedenpinnan yläpuolinen osa ajatellaan betonoiduksi kuivissa olosuhteissa ja vedenpinnan alapuolinen osa ajatellaan tehdyksi vedenalaisena valuna. Välituen ainemenekit muodostuvat tuen ylä- ja alaosan betonimäärästä sekä kummankin osan teräsmäärästä ja muottipinta-alasta. Paalutetussa välituessa on lisäksi huomioitava paa-lujen lukumäärä.

Välitukien ainemenekit vaihtelevat siksi paljon, että on vaikea löytää niille loogisia kuvaajia. Niinpä teräsmäärät ja muottipinta-alat betonikuutiota kohti on laskettu havaintoaineistosta suoraan keskiarvoina. Niille on saatu seuraavat arvot:

$$\begin{array}{llll}
 \text{terässilloissa} & Q_{rs} & = & 56,5 \text{ kg/m}^3 \\
 & Q_f & = & 1,58 \text{ m}^2/\text{m}^3 \\
 & Q'_{rs} & = & 26,3 \text{ kg/m}^3 \\
 & Q'_f & = & 0,48 \text{ m}^2/\text{m}^3
 \end{array} \quad (3.29)$$

$$\begin{array}{llll}
 \text{betonisilloissa} & Q_{rs} & = & 52,4 \text{ kg/m}^3 \\
 & Q_f & = & 1,65 \text{ m}^2/\text{m}^3 \\
 & Q'_{rs} & = & 30,2 \text{ kg/m}^3 \\
 & Q'_f & = & 0,65 \text{ m}^2/\text{m}^3
 \end{array} \quad (3.30)$$

Kaavoissa pilkku (') viittaa vedenalaiseen valuun eli tuen alaosaan. Yksittäisten arvojen hajonta käy selville taulukoista 3.25 ja 3.26. Varianssianalyysin avulla voidaan todeta, että terässiltojen ja betonisiltojen arvot eroavat merkittävästi toisistaan vain vedenalaisen muotin pinta-alan Q'_f osalta.

Betonimäärien suureen hajontaan vaikuttaa ainakin osaksi suunnittelukäytännön vaihtelevuus. Sama tuki voidaan tehdä massiiviseksi käyttäen paljon betonia ja vähän terästä ja muottia tai siroksi, jolloin teräs- ja muottimäärä betonikuutiota kohti tulevat isommiksi. Jos kummassakin tapauksessa arvioidaan tuen kokonaiskustannukset, ne saatavat poiketa vain vähän toisistaan, vaikka betonimäärissä onkin suuri ero. Tarpeetonta hajontaa voidaan pienentää siten, että betonimäärien sijasta tarkastellaan ainemenekistä laskettuja kustannuksia. Kun kustannukset jaetaan keskimääräisen betonikuution hinnalla, saadaan muunnettu betonimäärä. Sen lukuarvot käyttäytyvät alkuperäisiä lukuarvoja säännöllisemmin ja se soveltuu paremmin tilastolliseen käsittelyyn.

Muunnettu betonimenekki kuivalle ja vedenalaiselle betonille määritellään seuraavasti:

$$Q_c = \frac{480 + 6,2 \cdot Q_{rs} + 250 \cdot Q_f}{480 + 6,2 \cdot \bar{Q}_{rs} + 250 \cdot \bar{Q}_f} \cdot \frac{\text{kuivavalu (m}^3\text{)}}{b \cdot (H_i - D_i)} \quad (3.31)$$

$$Q'_c = \frac{500 + 4,4 \cdot Q'_{rs} + 250 \cdot Q'_f}{500 + 4,4 \cdot \bar{Q}'_{rs} + 250 \cdot \bar{Q}'_f} \cdot \frac{\text{vedenalainen valu (m}^3\text{)}}{b \cdot D_i} \quad (3.32)$$

Näin määritelty Q_c on oletetun vedenpinnan yläpuolisen ja Q'_c vedenpinnan alapuolisen tukilevyn paksuus silloin, kun tukirakenteiden massiivisuus on tavanomainen ja betoni on keskimääräisesti raudoitettua. \bar{Q}_{rs} ja \bar{Q}_f ovat kaavojen (3.29) ja (3.30) mukaisia keskimääräisiä teräs- ja muottimenekkejä betonikuutiota kohti. Kerroinosien numeroarvot ovat TVH:n yksikköhintaluettelon mukaisia betonin, teräksen ja muotin yksikköhintoja. Kustannusindeksi on 130/80.

Jos yksittäinen tuki on massiivisuudeltaan normaali, niin sen teräs- ja muottimäärä betonikuutiota kohti vastaa keskiarvoa. Tällöin muunnoskerroin saa arvon 1. Jos taas tuki on tavanomaista massiivisempi, niin teräs- ja muottimäärä betonikuutiota kohti ovat keskimääräistä pienempiä ja muunnoskerroin on < 1 . Muunnettu betonimäärä on tällöin todellista pienempi. Kaavat (3.31) ja (3.32) siis ilmoittavat, mikä olisi tuen betonimäärä, jos sen raudoitustiheys ja muottipinta-ala betonikuutiota kohti olisivat normaaleja.

Taulukoissa 3.25 ja 3.26 on esitetty teräs- ja betonisiltöjen välitukien ainemenekkejä. Niissä betonin ainemenekit ovat kaavojen (3.31) ja (3.32) mukaisia muunnettuja arvoja. Teräs- ja betonisillat on erotettu omiin taulukoihin, koska terässilloissa päällysrakenteen tukireaktio on huomattavasti pienempi kuin betonisilloissa. Tämä saattaa heijastua tuen ainemenekkeihin.

Kun taulukoiden betoni- ja paalumäärille lasketaan lineaariset regressiomallit, päädytään seuraaviin kaavoihin:

terässillat

$$Q_c \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)} = 1,51 + 0,017 \cdot b - 0,0033 \cdot l_i - 0,014 \cdot (H_i - D_i) \quad (3.33)$$

15 kpl $R^2 = 0,18$

$$Q'_c \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)} = 3,29 - 0,099 \cdot b + 0,0605 \cdot l_i - 0,1058 \cdot H_i \quad (3.34)$$

15 kpl $R^2 = 0,75$

$$n_p \text{ (kpl/m)} = 2,85 - 0,194 \cdot b + 0,1091 \cdot l_i \quad (3.35)$$

7 kpl $R^2 = 0,94$

betonisillat

$$Q_c \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)} = 1,75 - 0,024 \cdot b - 0,0055 \cdot l_i - 0,038 \cdot (H_i - D_i) \quad (3.36)$$

15 kpl $R^2 = 0,60$

$$Q'_c \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)} = 4,10 - 0,182 \cdot b + 0,020 \cdot l_i - 0,040 \cdot H_i \quad (3.37)$$

11 kpl $R^2 = 0,64$

Kaavan (3.33) korrelaatiokerroin on niin pieni, että sillä ei juuri ole tilastollista merkitsevyyttä. Yhtä hyvin voitaisiin käyttää suoraan taulukossa 3.25 ilmoitettua keskiarvoa $Q_c = 1,40 \text{ m}^3\text{/m}^2$.

Yhteenvetona välituen ainemenekkikaavoista todetaan, että tukilevyn leveyden ja korkeuden kasvaessa betonimäärä m^2 kohti yleensä pienenee. Jännemitan kasvaessa tuen yläosan betonimäärä pienenee mutta alaosan betonimäärä kasvaa.

Terässillan välituen paalumäärän kaava on samantyyppinen kuin tuen alaosan betonimäärän kaava. Paalutettujen betonisiltojen lukumäärä on niin pieni, ettei sen perusteella voida tehdä johtopäätöksiä paalumäärästä. Taulukon 3.26 r_p -arvot on saatu vertaamalla paalumäärää n_p terässiltojen vastaavan kaavan (3.35) antamaan arvoon.

Taulukko 3.25

Teräsiltojen välituet, 15 kpl

SILTA	Y	b	l ₁	H ₁	D ₁	Q _c	Q _{rs}	Q _f	Q' _c	Q' _{rs}	Q' _f	n _p	r _c	r' _c	r _p
		m	m	m	m	m ³ /m ²	kg/m ³	m ² /m ³	m ³ /m ²	kg/m ³	m ² /m ³	kpl/m			
Sampilan	82	6,5	26	8,4	3,7	1,28		1,73	3,25		0,61	4,92	0,87	0,98	1,11
Varpuvirtain	80	6,5	31,2	11,3	6,5	1,57		1,87	3,64		0,54		1,08	1,09	
Mourusalmen	78	7,5	32	15,5	10,2	1,33	25,9	1,85	2,53	12,1			0,91	0,89	
Suomussalmen	79	7,5	42	16	7,7	1,43	22,3	1,48	3,00	12,7		5,20	1,04	0,88	0,87
Kaivannonsalmen	83	7,5	53	15,8	6,2	1,38	114,2	2,00	3,85	28,2		7,47	1,04	0,94	1,04
Korssundin	81	7,5	53	24,4	18	0,99			3,58	16,4	0,54		0,72	1,13	
Lehtosalmen	79	8,5	59	19,5	9,5	1,80		1,31	3,64		0,42		1,37	0,92	
Kaitaisten	81	8,5	90	32,3	15	0,91		2,39	4,71		0,58	10,82	0,82	1,05	0,98
Karesuvannon	80	9	35	13,2	7,2	1,83		1,47	3,15		0,49	5,33	1,25	1,01	1,08
Visurin	81	10,5	26,4	11,5	7,5	1,72	55,7	1,64	2,36	27,6			1,11	0,90	
Juutuanjoen	78	11	29	10,7	6	1,28	51,4	1,62	3,09	16,5	0,49		0,83	1,09	
Ivalojoen	78	11,5	47,5	11	4	1,25	36,7	1,28	4,68	49,8	0,41	5,04	0,86	1,21	0,87
Kemijärven		13,25	81	23,1	12	1,48		0,91	4,17		0,54	9,66	1,13	0,94	1,06
Pekkalan	83	15	60	24,5	9	1,27	89,4	1,41	2,91	47,3	0,34		0,95	1,02	
Tornionjoen	77	17,5	64	14,7	7,3	1,47		1,14	3,68		0,36		0,99	0,95	
m		9,8	48,6	16,8	8,6	1,40	56,5	1,58	3,48	26,3	0,48	6,92	1,00	1,00	1,00
v		0,33	0,41	0,40	0,45	0,19	0,60	0,24	0,20	0,57	0,19	0,35	0,17	0,10	0,10

Taulukko 3.26

Betonisiltojen välituet, 16 kpl

SILTA	Y	b	l ₁	H ₁	D ₁	Q _c	Q _{rs}	Q _f	Q' _c	Q' _{rs}	Q' _f	n _p	r _c	r' _c	r _p
		m	m	m	m	m ³ /m ²	kg/m ³	m ² /m ³	m ³ /m ²	kg/m ³	m ² /m ³	kpl/m			
Mourusalmen	77	7,5	32	15,5	10,2	1,50	20,3	1,74	3,00	11,0			1,26	1,00	
Kivisalmen	81	7,5	53	19,4	6,7	0,67		1,63	2,84		0,72		0,85	0,35	
Kölkään	77	8	29,7	10,3	2,5	1,00	32,2	1,74	4,34	34,1	1,11		0,92	1,53	
Martin	75	8	32,4	10,9	4,1	1,27	27,5	1,48	3,43	27,9			1,14	1,21	
Naamijoen	78	8,5	21,6	8,4	3,5	0,94	42	2,08	1,96	29,8	0,72		0,76	0,74	
Ahkiolahden	81	8,5	28,8	17,5	0	0,74	63,9	1,57					1,04		
Luotsinmäen	82	10,5	53	19,3	11,3	0,48	55,6	1,78	2,55	26	0,80		0,54	1,04	
Juutuanjoen	78	11	29	10,7	6	1,32	52,5	1,62	2,67	16,9	0,52		1,15	1,19	
Tervonsalmen	76	11	43,5	15,1	6,3	0,83		1,63	2,07		0,57	4,55	0,92	0,88	0,83
Kautun	81	11,5	39	18,4	6	0,85		1,30	3,30		0,40		1,09	1,62	
Ruukinkosken	81	11,75	32,5	9,5	4,6	0,93	51,5	1,74	2,00	26,1			0,85	0,91	
Savilahden	81	12,3	38	18	6,4	0,65		1,77	1,56		0,47		0,81	0,83	
Halisten	81	13	24	14,5	3	0,83	76,5	1,17					0,36		
Halikon	78	13	38	15,8	0	0,73		1,30				2,92	1,18		0,65
Hopeaseppien	83	14	36	11,3	4,9	0,99	69,6	2,05	1,93	50,3	0,45	3,71	1,02	1,07	0,91
Vaajakosken	75	15	33,5	16,7	7,7	0,92		1,81	1,52		0,77		1,07	1,12	
m		10,7	35,2	14,5	5,2	0,92	52,4	1,65	2,55	30,2	0,65	3,73	1,00	1,00	0,80
v		0,23	0,25	0,26	0,60	0,29	0,31	0,15	0,32	0,34	0,33	0,22	0,15	0,15	0,17

3.4 Virhetarkastelu

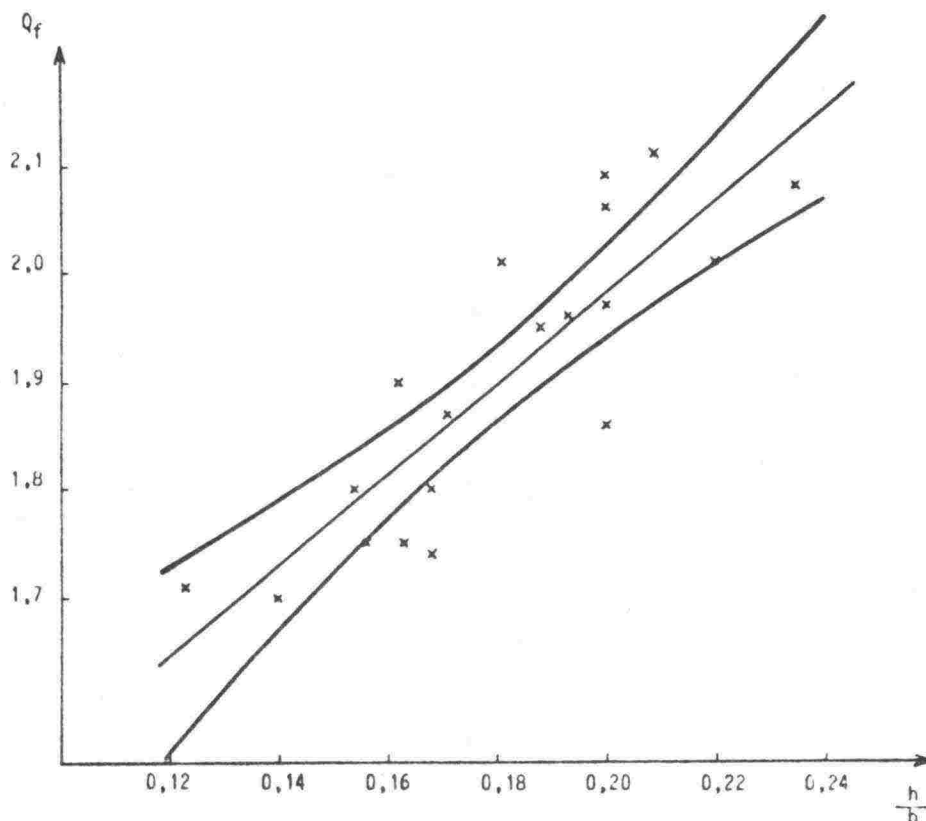
Tarkastellaan ainemenekkimallien virhelähteitä kuvan 3.5 esimerkin valossa. Se esittää jännitetyn palkkisillan muottimenekille laadittua mallia sovitettuna perusaineiston pistejoukkoon. Kärjistäen voidaan sanoa, että jokainen muottimenekkiä kuvaava piste on virheellinen. Virheitä aiheutuu ainakin seuraavista tekijöistä:

- olosuhteista
- suunnittelusta
- numeerisista virheistä

Olosuhteilla tarkoitetaan tässä sillan kuormitusta, kaarevuutta, vinoutta, tien kaltevuussuhteita ym. tekijöitä. Ne vaihtelevat silloittain ja aiheuttavat ainemenekkeihin tiettyä perushajontaa.

Suunnittelu aiheuttaa lopputulokseen hajontaa, jota voidaan pitää tarpeettomana. Sen vaikutusta voidaan pienentää hyvällä ohjauksella ja suunnittelun valvonnalla.

Numeeriset virheet massaluetteloissa ja tilastoissa aiheuttavat tarpeetonta hajontaa, joka on mahdollisuuksien mukaan poistettava tutkimusaineistosta. Se tapahtuu siten, että tilastollisesti muista poikkeavat tai epäloogiset yksittäistapaukset jätetään ainemenekkimallia laskettaessa pois. Tämä edellyttää kuitenkin suurta varovaisuutta, jotta ei samalla poistettaisi oikeita arvoja.



3.5 Regressiosuora (3.16) ja sen 95 % varmuusrajat

Yksittäisten pisteiden lisäksi voi myös malli olla virheellinen, ts. se ei kuvaa tarpeeksi hyvin tarkasteltavaa riippuvuutta. Mallin oikeellisuus on pyritty varmistamaan siten, että sen muoto on johdettu teoreettisesti ja vain kertoimet on määritetty tilastollisesti sovittamalla malli valittuun pistejoukkoon.

Eri virhelähteet aiheuttavat epävarmuutta regressiosuoran määrittämiseen. Kuvan 3.5 esimerkissä tämä epävarmuus on ilmaistu regressiosuoran varmuusrajoina. Suora asettuu 95 % todennäköisyydellä kuvaan piirrettyjen verhoikäyrien sisäpuolelle. Kuvasta on helppo nähdä, että virhe on pienimmillään pistejoukon painopisteen läheisyydessä. Virhemahdollisuus kasvaa pistejoukon reunoilta päin siirryttäessä. Virhe on siis sitä suurempi mitä enemmän argumentin $\frac{h}{b}$ arvo eroaa regressiomallin perustana olevan joukon $\frac{h}{b}$ -arvojen keskiarvosta.

Virhetarkastelua varten ainemenekkimallit on syytä jakaa kahteen ryhmään:

- kansirakenteen mallit
- alusrakenteen mallit

Alusrakenteen mallit ovat perusmittojen suhteen lineaarisia ja niitä voidaan käsitellä edellä esitetyllä tavalla. Ne poikkeavat kuvan 3.5 tapauksesta vain sikäli, että dimensioita on enemmän kuin kaksi. Kvalitatiivinen virhetarkastelu voidaan lineaarisen mallin osalta kiteyttää muotoon:

Lineaarisen mallin tarkkuus on sitä suurempi, mitä vähemmän muuttujien arvot poikkeavat mallin laskentaan käytetyn pistejoukon vastaavien arvojen keskiarvoista.

Kansirakenteen mallit ovat perusmuuttujien b , h ja l suhteen epälineaarisia. Edellä esitetty ehto mallin tarkkuudelle pitää siinäkin tapauksessa paikkansa. Ehto on riittävä, mutta se ei ole välttämätön. Tämä nähdään seuraavasta asetelmasta, joka selvittää tärkeimpien mallien muodostamista.

Sillan perusmitat	Johdetut suureet	Johdettujen suureiden suhteen lineaariset mallit
b	$\frac{l^2}{h}$	Liittopalkkisillan teräsmäärä Q_{ss} Betonisen palkki- tai kotelo- sillan kokonaisteräsmäärä $4,5Q_{ps}+Q_{rs}$ Betonisen palkki- tai kotelo- sillan betonimäärä Q_c Betonisen palkki- tai kotelo- sillan muottimäärä Q_f
h	$\frac{h}{b}$	
l	$\frac{h}{b}$	
	$\frac{l^2}{h}$	
	$\frac{1}{bh}$	Betonisen palkki- tai kotelo- sillan jänneteräsmäärä Q_{ps}

Merkitään

\bar{b} , \bar{h} ja \bar{l}

ovat mallin määrittämiseen käytetyn joukon perusmittojen keskiarvot,

b' , h' ja l'

ovat sen sillan perusmitat, jonka ainemenekkiä halutaan arvioida.

Jos nyt

$$b' = k^2 \bar{b}$$

$$h' = k^2 \bar{h}$$

(3.38)

$$l' = k \cdot \bar{l} \quad (k \text{ on mielivaltainen vakio})$$

niin ainemenekkien Q_{ss} , $4,5 Q_{ps}+Q_{rs}$, Q_c ja Q_f kaavoissa perusmitoista johdetut suureet $\frac{l^2}{h}$ ja $\frac{h}{b}$ pysyvät samoina

kuin perusaineistossa. Ainemenekkimallien virhe on tällöinkin mahdollisimman pieni.

$$\begin{aligned}
 \text{Jos taas} \quad b' &= \frac{1}{k} \bar{b} \\
 h' &= k^2 \bar{h} \\
 l' &= k \bar{l}
 \end{aligned}
 \tag{3.39}$$

niin ainemenekin Q_{ps} virhe on mahdollisimman pieni.

Yhteenvetona kansirakenteen ainemenekkimallien virheistä todetaan seuraavaa:

Virhe on sitä pienempi, mitä vähemmän perusmittojen arvot poikkeavat mallin laskentaan käytetyn pistejoukon vastaavien arvojen keskiarvoista, tai mitä lähempänä perusmittojen arvot ovat kaavojen (3.38) ja (3.39) suhteita.

4. KUSTANNUSMALLIT

4.1 Yleistä

Rakentamisen yhteydessä erotetaan yleensä neljä eri kustannusryhmää, nimittäin

- suunnittelukustannukset
- rakennuskustannukset
- kunnossapitokustannukset ja
- purkamiskustannukset.

Tässä yhteydessä tarkastellaan pelkästään rakennuskustannuksia.

Rakennuskustannuksilla on suuri merkitys sillansuunnittelussa. Suunnittelun alkuvaiheessa niiden avulla arvioidaan projektin suuruus. Suunnittelun edistyessä kustannukset muodostavat apuneuvon, jolla erilaiset siltavaihtoehdot saadaan keskenään yhteismitallisiksi. Tällöin kustannustasolla ei ole merkitystä, kunhan vain kustannusten suhteet ovat oikeat. Näin voidaan esim. verrata toisiinsa terässiltaa ja betonisiltaa, mikä olisi vaikeata pelkkien ainemenekkiarvioiden avulla. Usein rakennuskustannuksia käytetään myös rakenteellisen optimoinnin kohdefunktiona. Silloin tehtävänä on etsiä muuttujille annettujen reunaehtojen puitteissa sellaiset arvot, että kustannusfunktio saa minimiarvon.

Kussakin suunnitteluvaiheessa kustannusten arviointi tapahtuu erilaisista lähtökohdista käsin. Alustavassa suunnitteluvaiheessa on tärkeätä, että kustannusten arviointi on yksinkertaista eikä vaadi kovin pitkälle vietyjä teknisiä päätöksiä. Suunnittelun edistyessä kustannusarvioiden tarkkuusvaatimus kasvaa. Niiden on pystyttävä huomioimaan kaikki oleelliset kustannustekijät. Ainemenekit muodostavat hyvän arviointiperustan, mutta erityyppisiä ratkaisuja verrattaessa olisi hyvä huomioida erikseen työkustannukset. Jos kustannusfunktioita käytetään rakenteiden optimoinnissa, on niiden muotoon kiinnitettävä erityistä huomiota.

Seuraavassa käsitellään kolmenlaisia kustannusmalleja, joita voidaan käyttää tarpeen mukaan eri suunnitteluvaiheissa. Ne ovat

- m^2 -mallit
- yksikkökustannusmalli ja
- kustannuslajimalli.

m^2 -malli on näistä karkein. Seuraaviin malleihin siirryttäessä tarkkuuden voidaan olettaa kasvavan.

Kustannusmallien laadinta perustuu TVH:n keräämiin jälkilaskentatietoihin. Perusaineisto sisältää yli 300 sillan toteutuneet rakennuskustannukset. Pääosa aineistosta on vuosilta 75-81. Kaikkien siltojen kustannukset on muutettu vuoden 1980 kustannustasoon (ind. 100).

4.2 m²-mallit

Termillä m²-malli tarkoitetaan tässä sellaista kustannusmallia, joka antaa suoraan sillan kokonaiskustannukset mk/m². Sillan pinta-alaksi määritellään

$$A = b \cdot \sum l$$

kun b on sillan hyödyllinen leveys ja
 $\sum l$ on jännemittojen summa (+ulokkeet).

Kokonsa perusteella sillat jaetaan tässä kolmeen ryhmään seuraavasti:

- pienet sillat, joita ovat mm.
 - TOBI-elementtisillat
 - laattakehät
 - puusillat
 - yksiaukkoiset terässillat
- keskisuuret sillat
 - jännitetyt betonielementtisillat
 - betoniset laattasillat
 - teräsbetoniset palkki- ja kotelosillat
- suuret sillat
 - jännitetyt palkki- ja kotelosillat
 - betonikantiset jatkuvat teräspalkkisillat

Pienten siltojen kustannuksia ei tässä käsitellä.

Keskisuurten siltojen m^2 -malli on esitetty kuvassa 4.1. Malli on kehitetty perusaineistoa analysoimalla. Aineistoa ryhmiteltiin eri tavoin ja tilastomatemattisia menetelmiä käyttäen tutkittiin eri tekijöiden vaikutusta siltojen kustannuksiin. Analysoinnin perusteella todettiin seuraavat tekijät merkitseviksi:

- Sillan sijainti valtakunnallisesti
Lapin piirin sillat todettiin muun maan siltoja kalliimmiksi. Ne eivät sisälly kuvan 4.1 aineistoon.
- Kuormitus
Kevyen liikenteen sillat ovat luonnollisesti halvempia kuin ajoneuvoliikenteen sillat
- Onko kysymyksessä maasilta vai vesistösilta
- Perustamistapa
- Sillan hyödyllinen leveys b

Muilla sillan mitoilla, kuten kokonaispituus tai jännemitat, ei käytettävissä olleen aineiston perusteella ollut merkitsevää kustannusvaikutusta. Näin päädyttiin hyvin yksinkertaiseen kustannusmalliin. Siinä sillan leveys huomioidaan kertoimella \sqrt{b} , jossa b :n yksikkönä on [m]. Kertoimen muoto on puhtaasti kokeellinen. Valittu muoto kuvasi kokeilluista vaihtoehdoista parhaiten kustannusfunktiota. Mallin puutteena on pidettävä sitä matemaattista ominaisuutta, että kun

$$b \rightarrow \infty, \quad \text{niin } C \rightarrow 0.$$

Senvuoksi mallia on sovellettava harkiten hyvin leveisiin siltoihin. Niinpä b :n ylittäessä 20 m suositellaan käytettäväksi $b = 20$.

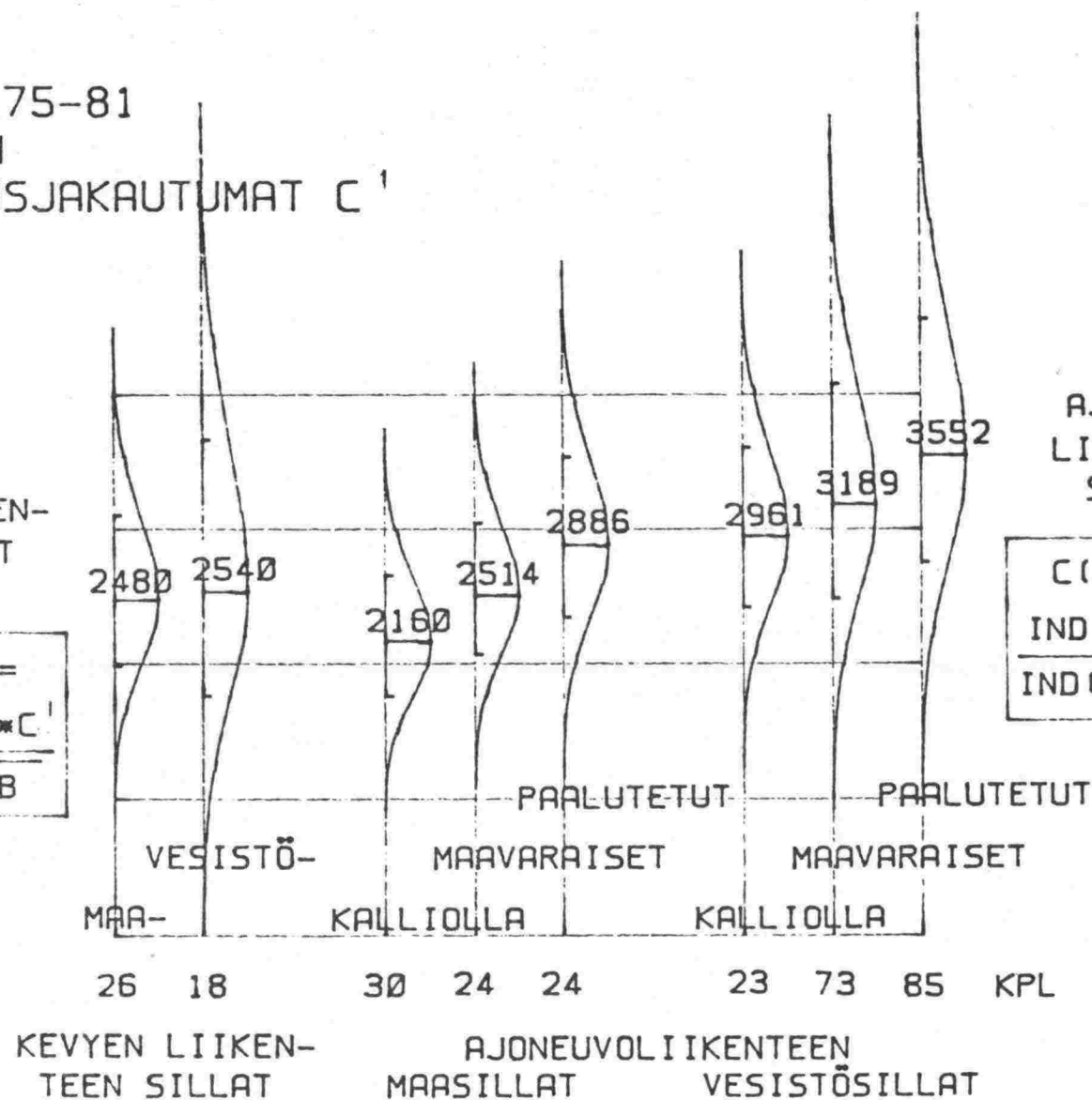
VUOSIEN 75-81
SILTOJEN
KUSTANNUSJAKAUTUMAT C'

KEVYEN LIIKEN-
TEEN SILLAT

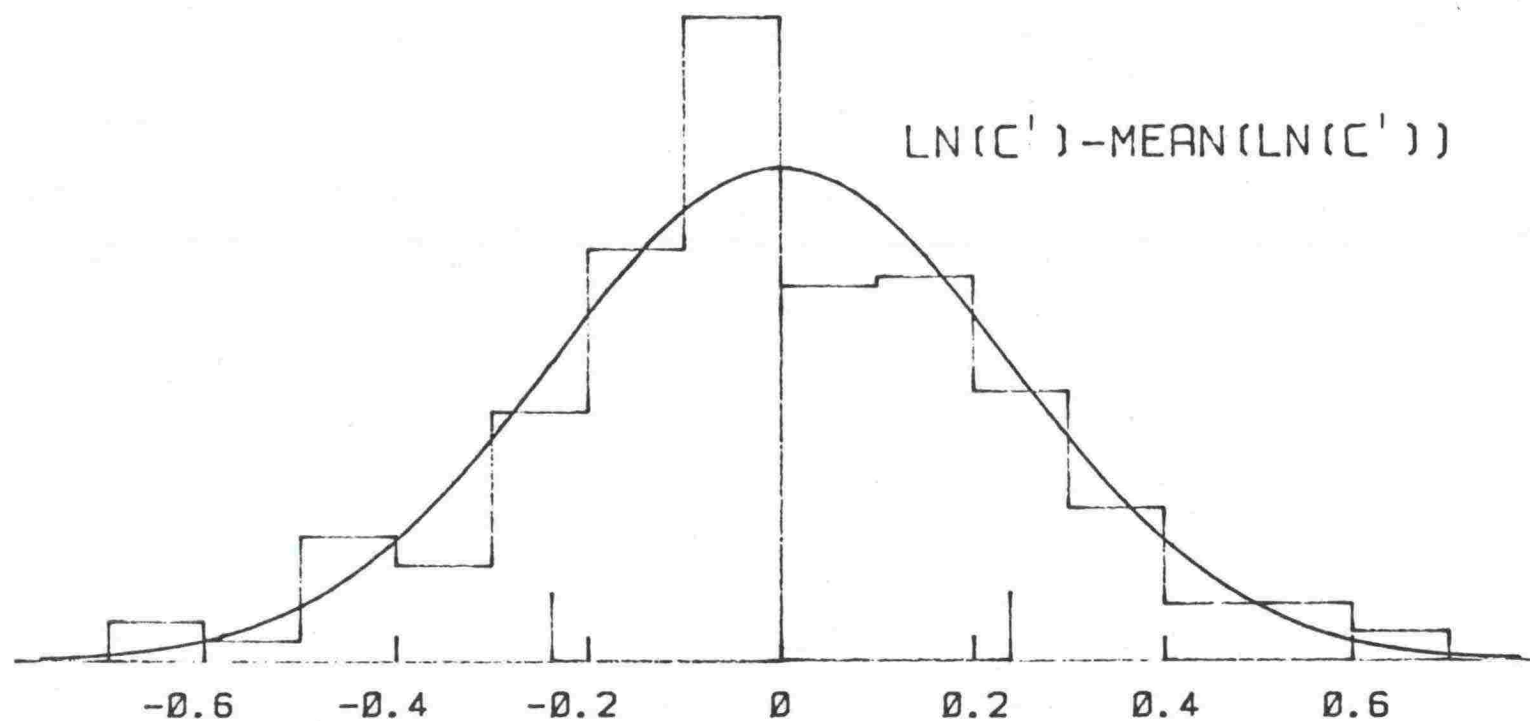
$$C (MK/M^2) = \frac{IND(T)}{IND(80)} * \frac{2 * C'}{\sqrt{B}}$$

AJONEUVO-
LIIKENTEEN
SILLAT

$$C (MK/M^2) = \frac{IND(T)}{IND(80)} * \frac{3 * C'}{\sqrt{B}}$$



SILTAKUSTANNUSTEN JAKAUTUMAKUVIO
YHTEENSÄ 303 SILTAA
VARIATIOKERROIN = 0.236



Kuva 4.2

Siltakustannusten logaritminen jakautuma

Mallin perusarvo C' vastaa kevyen liikenteen silloissa 4 metrin ja ajoneuvoliikenteen silloissa 9 metrin levyisen sillan m^2 -kustannuksia. Sille on kuvassa 4.1 annettu silta-
tapaikan ja perustamistavan mukaiset arvot. Siltojen kustannusjakautuma on oletettu logaritmiseksi siten, että $\ln C'$ muodostaa normaaliyakautuman. Kuvassa 4.2 on 303 sillan kustannustiedot piirretty logaritmisien jakautuman muotoon ja verrattu sitä teoreettiseen jakautumaan. Teoreettinen jakautuma on piirretty kuvan 4.1 kustannusmalliin normaaliasteikolle. Tällöin kustannusarvojen hajonta ylöspäin on suurempi kuin alaspäin. Numeeriset C' -arvot ovat logaritmisien jakautuman keskiarvoja. Ne ovat hiukan pienempiä kuin olisivat oletetun normaaliyakautuman keskiarvot. Kuvan alaosassa on ilmoitettu kunkin C' -arvon laskennassa huomioitu siltojen lukumäärä.

Kustannusmallin laadinnassa käytettyjen siltojen tarkempi erittely käy ilmi taulukoista 4.1 ja 4.2. Niissä on ilmoitettu kunkin ryhmän siltojen leveys, suurin jännemitta ja jännemittojen summa jakautumamuodossa siten, että kustakin on annettu oletetun normaaliyakautuman keskiarvo + hajonta. Tällöin on mahdollista verrata eri ryhmiä toisiinsa ja tutkia onko siltojen geometrisissa mitoissa merkitsevää eroa. Taulukoissa on eron merkitsevyys kahden ryhmän välillä ilmoitettu tähdillä siten, että yksi tähti (*) tarkoittaa melkein merkitsevää ja kaksi tähteä (**) merkitsevää eroa.

Taulukko 4.1 Yhteenveto kevyen liikenteen siltojen m^2 -kustannuksista. Ind. 100/80

Siltatyyppi	kpl	b	l_{\max}	$\sum l$	$C \cdot \frac{\sqrt{b}}{2}$	
		m	m	m	Keskiarvo mk/ m^2	Variaatio kerroin
Kevyen liikenteen maasillat	26	4,2 \pm 0,5	20,7 \pm 4,5	57 \pm 22	2480	0,22
		*		*		
Kevyen liikenteen vesistösillat	18	3,8 \pm 0,7	18,5 \pm 5,5	37 \pm 28	2540	0,39

Taulukko 4.2

Yhteenveto keskisuurten tiesiltojen
m²-kustannuksista. Ind. 100/80.

Siltatyyppi	kpl	b	l _{max}	Σ l	$C \cdot \frac{\sqrt{b}}{3}$	
		m	m	m	Keski- arvo mk/m ²	Vari- atio- kerroin
Kalliolle perustetut maasillat	30	15,7 _± 7,4	15,4 _± 4,4	46 _± 20	2160	0,21
					**	
Maavaraiset maasillat	24	12,6 _± 3,3	17,3 _± 3,5	51 _± 19	2514	0,18
					*	
Paalutetut maasillat	24	15,6 _± 6,6	16,0 _± 3,2	46 _± 20	2886	0,19
Kalliolle perustetut vesistösillat	23	9,5 _± 3,0	17,2 _± 5,2	40 _± 20	2961	0,22
		*		**		
Maavaraiset vesistösillat	73	8,2 _± 2,1	17,4 _± 4,2	29 _± 15	3189	0,25
		*			**	
Paalutetut vesistösillat	85	9,4 _± 3,4	18,5 _± 4,9	32 _± 17	3552	0,25

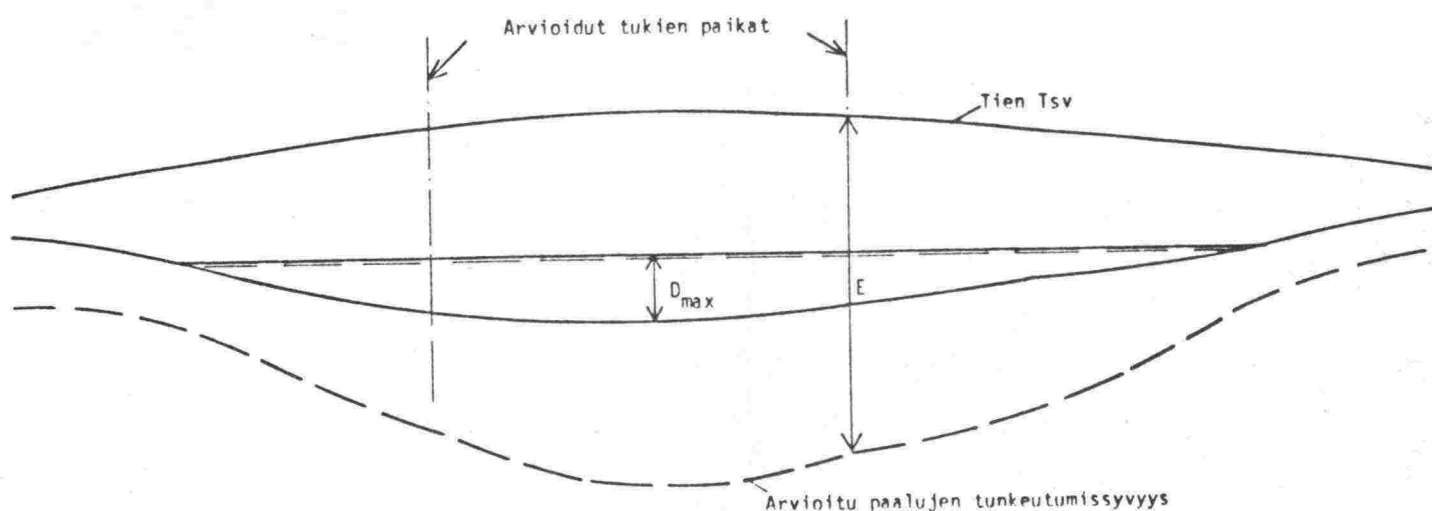
Tiesiltojen taulukosta 4.2 nähdään esim., että aineiston maavaraiset vesistösillat ovat kalliolle perustettuja ja paalutettuja vesistösiltoja kapeampia. Kalliolle perustetut vesistösillat taas ovat muita vesistösiltoja pidempiä. Nämä syyt saattavat vaikuttaa yhdessä siihen, että kalliolle perustettujen ja maavaraisten vesistösiltojen m²-kustannuksille ei saatu tilastollisesti merkitsevää eroa.

Siltojen kustannusaineistoa analysoitaessa löydettiin kaksi siltaryhmää, joiden kustannukset olivat muista poikkeavat. Ne olivat taulukossa 4.3 esitettyt ylikulkusillat ja jännebetonielementeistä rakennetut maasillat. Taulukossa on erojen merkitsevyys taulukon 4.2 vastaviin kohtiin verrattuna merkitty tähdillä (*). Taulukon mukaan kalliolle perustetut ja maavaraiset ylikulkusillat olivat keskimäärin 26 % muita siltoja kalliimpia. Paalutettujen ylikulkusiltojen osalta ei voida sanoa mitään, koska aineisto poikkeaa merkitsevästi taulukon 4.2 perusaineistosta. Ylikulkusiltojen kalleus on ymmärrettävää, sillä junaliikennettä ei yleensä voi katkaista sillan rakennustyön ajaksi. Tämä nostaa sillan kustannuksia. Lisäksi kustannuksia lisäävät sähköratoja ylittäviin siltoihin rakennettavat kosketussuojat.

Elementtisiltojen osalta todetaan, että maavaraiset sillat ovat perusaineiston siltoja lyhyempiä ja paalutettujen siltojen jännemitat ovat perusaineiston jännemittoja isommat. Nämä seikat selittävät ainakin osaksi maavaraisten ja paalutettujen elementtisiltojen kalleuden. Sen sijaan kalliolle perustetut elementtisillat näyttävät kiistatta vastaavia paikalla valettuja siltoja kalliimmilta.

Taulukko 4.3 Poikkeavien siltatyypin suhteellisia kustannuksia.

Siltatyyppi ja perustus	kpl	b	l _{max}	Σ 1	$\frac{C}{C_{\text{malli}}}$	
					keski- arvo	vari- aatio- kerroin
Ylikulkusillat						
kalliolla	6	10,8 _{+2,4}	17,1 _{+2,8}	72,0 _{+74,2}	1,26*	0,24
maavaraiset	9	11,7 _{+3,3}	17,4 _{+3,6}	60,5 _{+47,1}	1,26**	0,26
paalutetut	4	11,4 _{+5,3}	24,0 _{+4,1**}	106,6 _{+34,6**}	1,01	0,13
Jbe-maasillat						
kalliolla	8	10,1 _{+4,8*}	18,0 _{+3,2}	35,2 _{+41,3}	1,40**	0,18
maavaraiset	10	11,3 _{+3,0}	18,2 _{+2,7}	22,1 _{+13,1**}	1,38**	0,40
paalutetut	4	14,5 _{+3,8}	22,6 _{+5,3**}	117,3 _{+140,5*}	1,26*	0,26



Kuva 4.3 Vesistö sillan kustannusmallissa käytettyjä merkintöjä

Seuraavassa tarkastellaan suurten siltojen kustannusmallia. Se on laadittu siten, että mallin käyttäjän ei paljonkaan tarvitse tietää tulevasta siltaratkaisusta. Tärkeimmät muuttujat kuvaavat tien tasausta ja siltapaikan pohjaolosuhteita kuvan 4.3 mukaisesti. Yleensä silta pyritään suunnittelemaan optimaalisesti siten, että perustamissyvyyden kasvaessa sillan pääjälkeen pituus kasvaa. Senvuoksi ei kustannusmallin tarvitse sisältää jännemittaa, vaikka se vaikuttaakin voimakkaasti sillan kustannuksiin. Jännemittan kustannusvaikutus tulee huomioitua välillisesti perustamissyvyyden kautta. Puhtaasti empiiristä tietä päädytään seuraavanmuotoiseen kustannusmalliin.

$$C \text{ (mk/m}^2\text{)} = k_1 + k_2 \frac{1}{\sqrt{b}} + k_3 (2 D_{\max} + E) + k_4 \cdot n \quad (4.1)$$

jossa C on sillan kokonaiskustannus $\left[\text{mk/m}^2 \right]$

b on sillan hyödyllinen leveys $[\text{m}]$

n on sillan jänteiden lukumäärä

D_{\max} ja E käyvät ilmi kuvasta 4.3

$k_1 \dots k_4$ ovat tuntemattomia vakioita

Kaavan toinen termi kuvaa sillan leveyden vaikutusta samalla tavalla kuin keskisuurten siltojen kustannusmallissa. Alustavien laskelmien avulla todettiin, että vesisyvyyden D_{\max} vaikutus on noin kaksinkertainen E:n vaikutukseen verrattuna ja muuttujat yhdistettiin yhdeksi termiksi. Viimeinen termi kuvaa sillan pituutta. Siltajänteiden lukumäärää ei tietenkään tunneta alustavassa suunnitteluvaiheessa, mutta siitä riittää suuruusluokka-arvio. Viimeisen termin avulla malli saadaan paremmin sopimaan hyvin pitkiin siltoihin, joissa toistuvuus pienentää rakennuskustannuksia.

Taulukkoon 4.4 on kerätty terässiltojen ja taulukkoon 4.5 betonisiltojen numerotietoja. Tässä aineistossa Lapin piirin siltojen ei todettu tilastollisesti poikkeavan muun maan silloista. Senvuoksi niitä ei ole poistettu aineistosta. Jännemittojen keskiarvo 1 on havainnollisuuden vuoksi otettu mukaan, vaikkei sitä käytetäkään mallin muodostamiseen. Sellaiset sillat, jotka jostakin syystä eivät sovi aineistoon, on esitetty erikseen taulukossa 4.6. Kun taulukoiden 4.4 ja 4.5 yhteiselle aineistolle lasketaan kaavan (4.1) mukainen regressiomalli, saadaan

$$C(\text{mk/m}^2) = 3400 + 4765 \left(\sqrt{\frac{1}{b}} - \frac{1}{3} \right) + 20,89 \cdot (2 D_{\max} + E - 40) - 35,7 \cdot (n - 4) \quad (4.2)$$

31 kpl

$$R^2 = 0,62$$

Malli on muotoiltu siten, että ensimmäinen termi ilmoittaa suoraan keskiarvosillan m^2 -kustannukset vuoden 1980 kustannustasossa. Muut termit korjaavat arviota sen mukaan, miten paljon arvioitava silta poikkeaa keskimääräisestä.

Taulukko 4.4 m²-kustannuksia, Ind. 100/80
Terässillat, 17 kpl

Silta	Y	l m	b m	D _{max} m	E m	n kpl	C mk/m ²	r
Sampilan	83	24,3	6,5	2	12	3	3362	1,05
Visurin	81	25,4	10,5	5	12	3	2910	0,99
Taininiemen	81	25,9	7,5	2	8	3	2664	0,89
Hynnälänsalmen	78	27,4	8,5	6	32	4	3863	1,09
Varpuvirtain	81	30,0	6,5	5	15	3	3253	0,96
Karesuvannon	80	32,2	9,0	8	25	5	3306	0,98
Mourusalmen	80	32,8	7,5	8	15	5	2803	0,84
Kuusankosken	81	45,3	13,25	14	31	6	3310	0,96
Ivalojoen	79	45,9	11,5	3	31	3	3673	1,15
Korssundin	82	46,7	7,5	17	25	3	4938	1,24
Inkeröisten	79	48,1	13,0	0	6	3	2342	0,95
Lehtosalmen	80	51,3	8,5	8	20	3	4252	1,25
Pekalan	83	54,7	15,0	8	30	8	3566	1,18
Tornionjoen	79	60,0	17,5	6	14	5	2816	1,07
Vårdön	80	62,4	8,0	19	43	5	4104	0,95
Kaitaisten	82	76,7	8,5	15	65	6	4306	0,95
Kemijärven	82	78,0	13,25	20	28	4	3645	0,98
m		45,1	10,1	8,6	24,2	4,2	3477	1,03
v		0,38	0,32	0,72	0,60	0,35	0,19	0,12

Taulukko 4.5 m²-kustannuksia, Ind. 100/80.
Jännitetyt betonisillat, 14 kpl

Silta	Y	l m	b m	D _{max} m	E m	n kpl	C mk/m ²	r
Könkään	79	28,6	8,0	2	10	3	2908	0,97
Ruukinkosken	83	31,3	11,75	4	10	3	2887	1,04
Sipoonlahden	75	32,8	12,5	2	50	20	2928	1,02
Hopeaseppien	85	33,2	14,0	5	31	5	2835	0,92
Kautun	82	34,9	11,5	3	20	9	2734	1,00
Savilahden	82	36,0	12,3	4	28	8	3044	1,03
Halikon	82	36,7	13,0	4	35	3	2821	0,87
Hevosluodon	85	38,0	10,5	5	41	3	3537	1,00
Kiuralan	79	39,3	8,5	10	26	4	3030	0,85
Harjavallan	83	40,0	14,5	13	20	4	3077	0,97
Keikyän	80	43,3	12,0	5	16	3	2950	1,01
Luotsinmäen	85	44,0	10,5	9	19	4	2712	0,84
Norssalmen	83	45,0	13,0	15	29	5	3391	0,97
Kivisalmen	81	46,7	7,5	5	19	3	3490	1,04
m		37,8	11,4	6,1	25,3	5,5	3025	0,97
v		0,15	0,19	0,66	0,45	0,83	0,09	0,07

Taulukoiden viimeisessä sarakkeessa on suhdeluku r , joka on sillan toteutuneiden rakennuskustannusten suhde mallin (4.2) antamaan arvoon. Sen keskiarvo on terässilloilla 1,03 ja betonisilloilla 0,97. Erolla ei kuitenkaan ole tilastollista merkitystä. Kun terässiltojen ja betonisiltojen jakautumat eivät muussakaan suhteessa poikkea merkittävästi toisistaan, ne ovat tämän aineiston mukaan kustannuksiltaan samanarvoisia. Terässiltojen kustannusten hajonta malliin verrattuna on 12 % ja betonisiltojen 7 %.

Taulukon 4.6 siltoja ei ole käytetty kustannusmallin muodostamiseen. Siihen on kerätty aineiston risteys- ja ylikulkusillat, joita varten kustannusmallia ei varsinaisesti ole tarkoitettu. Lisäksi taulukossa on joukko siltoja, joiden kustannukset näyttävät oleellisesti poikkeavan muusta aineistosta. Taulukkoon on laskettu kaksi eri suhteellista kustannusarvoa, joista r on todellisten kustannusten suhde suurten siltojen kustannusmalliin (4.2) ja r_1 on suhde keskisuurten siltojen kustannusmalliin (kuva 4.1). Jälkimmäinen ei huomioi jännemittojen kustannusvaikutusta eikä tästä syystä sovi kovin hyvin suurille silloille. Taulukon 4.6 aineistossa jännemitat ovat kuitenkin siksi vaatimattomia, että niillä ei ole suurta kustannusvaikutusta. Näin keskisuurten siltojen kustannusmallin käyttö on perusteltua. Vertaamalla suhdelukujen r ja r_1 numeroarvoja toisiinsa todetaan, että ne vastaavat silloittain melko hyvin toisiaan. Tästä voidaan päätellä, että suuriin kustannuseroihin täytyy olla jokin kustannusmalleista riippumaton syy.

Taulukko 4.6 m^2 -kustannuksia, Ind. 100/80
Muu aineisto, 12 kpl

SILTA	Y	\bar{l} m	b m	D_{max} m	E m	n kpl	C mk/m ²	r	r_1	Huom !
Kaunismäen rs.	81	25,0	10,5	0	23	4	2355	0,80	0,88	
Tourulan yk.	76	27,0	11,5	0	21	10	2955	1,13	1,16	
Eteläntien rs.	78	29,3	10,5	0	17	4	2667	0,95	1,33	
Haapalahden rs.	77	31,0	7,1	0	19	4	2719	0,86	0,83	
Äimäraution yk.	83	41,0	15,25	0	15	4	3096	1,23	1,60	Liittopalkki-
Juutuanjoen	78	28,0	11,0	3	10	3	4844	1,74	1,68	silta
Suomussalmen	82	38,7	13,25	5	34	3	5621	1,73	1,44	"
Hanhiluodon	84	26,0	10,5	4	30	3	2307	0,70	0,70	Välitukina
Saharannan	78	29,3	11,5	5	40	3	2588	0,75	0,82	kaivinpaalut
Martin	77	31,2	8,0	2	11	3	5182	1,72	1,53	"
Tervonsalmen	78	39,3	11,0	5	21	4	4396	1,44	1,37	

Lopuksi tarkastellaan mallin (4.2) soveltuvuutta norjalaiseen aineistoon. Kirjallisuusluettelon lähteessä /9/ on annettu eräiden jännitettyjen betonisiltojen rakennuskustannukset vuoden 1973 kustannustasossa. Sillat ovat pitkäjänteisiä vuonosiltoja ja niiden alikulkukorkeus on yleensä suuri. Geometriatietojen lisäksi jokaisesta sillasta on lähteessä esitetty sivukuva, josta voidaan arvioida kustannusmallin käytössä tarvittavat siltapaikan pohjaolosuhteet. Siltojen numeroarvot on esitetty taulukossa 4.7. Sillat, joiden kustannustiedot ovat puutteellisia, on jätetty pois taulukosta. Vertailuarvoa r laskeuttaessa toteutunut m^2 -kustannus on muunnettu Suomen markoiksi kertoimella 0,75 (1 Nkr = 0,75 mk). Korjaus vuoden 1980 kustannustasoon on tehty rakennuskustannusindeksin avulla.

Taulukosta nähdään, että esitetty kustannusmalli sopii yllättävän hyvin valittuun norjalaiseen aineistoon. Tulos on yllättävä siksi, että norjalaiset sillat poikkeavat tyypiltään ja rakennustavaltaan suomalaisista silloista. Yleensäkin kustannusten vertailu kahden maan välillä on arveluttavaa. Taulukon 4.7 perusteella ei missään tapauksessa saa tehdä johtopäätöksiä norjalaisten ja suomalaisten siltojen kustannuseroista.

Taulukko 4.7 Lähteen /9/ mukaisten norjalaisten siltojen m^2 -kustannuksia 73-tasossa, 15 kpl. 1 kr = 0,75 mk

Silta	b m	D _{max} m	E m	n kpl	C kr/m ²	r
1	8,9	27	65	10	3090	1,07
2	8,5	29	76	21	2931	1,03
3	8,5	14	49	21	2427	1,13
4	10,1	10	58	34	1449	0,80
5	9,3	25	65	34	2461	1,07
6	9	0	20	4	1904	1,07
7	10,4	10	28	7	1186	0,59
10	8,5	5	23	3	1603	0,81
11	5,5	0	20	5	2200	1,09
14	8	13	27	18	1925	0,99
15	8	13	37	13	1722	0,79
16	5,5	15	38	40	1904	1,02
18	13,5	0	16	11	908	0,65
19	12,3	6	36	11	2038	1,11
20	10	0	220	30	2785	0,76
m	9,1	11	52	17,5	2036	0,93
v	0,23	0,88	0,97	0,69	0,31	0,19

4.3 Yksikkökustannusmalli

Lähteessä /26/ kustannusten muodostumista havainnollistetaan kolmiulotteisella kappaleella. Betonisiltoihin sovellettuna ja yksinkertaistettuna se saa kuvassa 4.4 esitetyn muodon. Siinä on pystyakselilla esitetty sillan osa ja vaaka-akselilla suorite, joka on esitetty täydellisenä vain päällysrakenteen osalta. Näin saadaan luvun 3 aine-
menekkimalleja vastaava kustannusten jaottelu. Kolmannen akselin suunnassa oleva kustannuslaji jätetään yksikkökustannusmallissa huomiotta.

Matemaattisen kaavan muodossa malli on seuraava:

$$C = C_0 + \sum C ,$$

jossa C_0 tarkoittaa yhteiskustannuksia

ja $\sum C$ käsittää sillan osien kustannukset.

Tilastollista käsittelyä varten kustannusmalli kirjoitetaan muotoon

$$C = k_1 + k_2 D_{\text{imax}} + k_3 (C_d + C_s) + k_4 (C_a + C_i) \quad (4.3)$$

jossa $D_{\text{imax}} = \max$ (MW-anturan alapinta),

C_d on päällysrakenteen kustannus ilman telineitä,

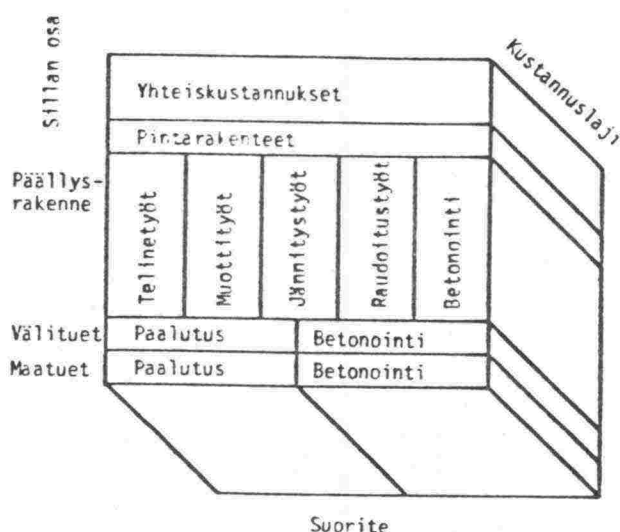
C_s on telineiden, pintarakenteiden ja kaiteiden kustannus,

C_a on maatukien kustannus,

C_i on välitukien kustannus

ja k_i :t ovat toistaiseksi tuntemattomia vakioita.

Kaavassa on yhteiskustannukset hajotettu osiin siten, että ne muodostuvat vesisyvyyden mukana kasvavasta perusosasta ja suhteellisesta osasta. Jälkimmäinen määräytyy yhteiskustannuskertoimesta, joka oletetaan erisuuruiseksi alusrakenteiden ja päällysrakenteen osalta.



Kuva 4.4 Jännitetyn betonisillan tyypillinen kustannusjakautuma

Sillan osien kustannukset $C_d \dots C_i$ lasketaan matriisilausekkeesta

$$C = Q^T F A = (J + KG)^T F A \quad (4.4)$$

jossa Q on ainemenekkejä vastaavista suoritteista koostuva vektori,

F on yksikkökustannusmatriisi,

A on sillan osan pinta-ala,

G on sillan osan geometrisista mitoista laskettava vektori,

J ja K ovat ainemenekkimallien vakiovektori ja kerroinmatriisi.

Kun luvussa 3 johdetut ainemenekkimallit kirjoitetaan matriisimuotoon, saadaan seuraavat yhtälöt:

2-palkkisen liittopalkkisillan kantava rakenne

$$\begin{Bmatrix} Q_{ss} \\ Q_c \\ Q_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 24,3 \\ 0,216 \\ 0,96 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0,0748 & 272 & 0 & 0 \\ 0,000021 & 0 & 0,0072 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,20 \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \frac{1}{h} \\ \frac{1}{h} \\ \frac{1}{b} \\ \frac{1}{b} \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

Jännitetyn betonisen palkkisillan kantava rakenne

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ Q_{ps} \\ Q_{rs} \\ Q_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0,411 \\ -1,73 \\ 99,1 \\ 1,146 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,000054 & 0,834 & 0 \\ 0,02017 & 0 & 5,37 \\ 0,02144 & 46,4 & -24,16 \\ 0 & 4,18 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \frac{1^2}{h} \\ \frac{h}{b} \\ \frac{1}{bh} \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

Jännitetyn betonisen kotelosillan kantava rakenne

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ Q_{ps} \\ Q_{rs} \\ Q_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0,411 \\ -2,56 \\ 102,8 \\ 1,375 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,000054 & 0,834 & 0 \\ 0,02015 & 0 & 4,18 \\ 0,02153 & 46,4 & -18,81 \\ 0 & 4,94 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \frac{1^2}{h} \\ \frac{h}{b} \\ \frac{1}{bh} \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

Teräsbetonisen palkkisillan kantava rakenne

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ Q_{rs} \\ Q_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0,514 \\ 85,8 \\ 1,16 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,000068 & 1,042 \\ 0,105 & 43,6 \\ 0 & 4,22 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \frac{1^2}{h} \\ \frac{h}{b} \end{Bmatrix} \quad (4.8)$$

Teräsbetonisen kotelosillan kantava rakenne

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ Q_{rs} \\ Q_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0,473 \\ 90,4 \\ 1,44 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,000062 & 0,959 \\ 0,111 & 45,9 \\ 0 & 5,19 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \frac{1^2}{h} \\ \frac{h}{b} \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

Betonisen laattasillan kantava rakenne,
normaalipoikkileikkaus

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ Q_{rs} \\ Q_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 67,1 \\ 1,09 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1,05 & 0,165 & 1,785 & -3,15 \\ 0,133 & 2,68 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,236 & 0,354 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \frac{1^2}{h} \\ \frac{1}{bh} \\ \frac{h}{b} \\ \frac{1}{b} \\ \frac{h}{b} \\ \frac{h^2}{b} \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

Kevennetyn betonisen laattasillan kantava rakenne

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ Q_{rs} \\ Q_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 50,8 \\ 1,15 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,86 & 0,135 & 1,462 & -2,58 \\ 0,108 & 9,86 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,359 & 0,374 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \frac{1^2}{h} \\ \frac{1}{bh} \\ \frac{h}{b} \\ \frac{1}{b} \\ \frac{h}{b} \\ \frac{h^2}{b} \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

Kannen telineiden + pintarakenteiden sekä kaiteiden aine-
nemenekit saadaan yhtälöstä

$$\begin{Bmatrix} Q_s \\ Q_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2g \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 1 \\ \frac{1}{b} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} + KG \quad (4.12)$$

kun g on kaiteen metripaino. Q_s :n yksikkö on $[m^2/m^2]$
ja Q_r :n yksikkö $[kg/m^2]$.

Maatuet

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ n_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1,252 \\ 1,52 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,0398 & 0,0146 & 0,1064 \\ -0,110 & 0,035 & 0,266 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \frac{b}{\cos \varphi} \\ l_a \\ H_a \end{Bmatrix} \quad (4.13)$$

Terässiltojen välituet

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ Q'_c \\ n_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1,51 \\ 3,29 \\ 2,85 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,017 & -0,0033 & -0,014 & 0,014 \\ -0,099 & 0,0605 & -0,1058 & 0 \\ -0,194 & 0,1091 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} b \\ l_i \\ H_i \\ D_i \end{Bmatrix} \quad (4.14)$$

Betonisiltojen välituet

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ Q'_c \\ n_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1,75 \\ 4,10 \\ 2,28 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,024 & -0,0055 & -0,038 & 0,038 \\ -0,182 & 0,020 & -0,040 & 0 \\ -0,155 & 0,087 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} b \\ l_i \\ H_i \\ D_i \end{Bmatrix} \quad (4.15)$$

Sillan osien kustannukset lasketaan seuraavista muotoa

$$C = Q^T F A \text{ olevista kaavoista:}$$

Liittopalkkisillan kantava rakenne

$$C = \begin{Bmatrix} Q_{ss} & Q_c & Q_f \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} c_{ss} \\ 218 \cdot c_{rs} + c_c \\ c_f \end{Bmatrix} \times b \times \sum 1 \quad (4.16)$$

Betonisillan kantava rakenne

$$C = \begin{Bmatrix} Q_c & Q_{ps} & Q_{rs} & Q_f \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} c_c \\ c_{ps} \\ c_{rs} \\ c_f \end{Bmatrix} \times b \times \sum 1 \quad (4.17)$$

Teräsbetonisilloissa $Q_{ps}=0$, joten myös c_{ps} voidaan jättää pois ja vektoreihin jää vain kolme alkioita.

Telineet, pintarakenteet ja kaiteet

$$C = \begin{Bmatrix} Q_s & Q_r \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} c_{su} + c_s \\ c_r \end{Bmatrix} \times b \times \sum 1 \quad (4.18)$$

Maatuet

$$C = \begin{Bmatrix} Q_c & n_p \end{Bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,77 \cdot c_f + 47 \cdot c_{rs} + c_c & 0 \\ 0 & c_p \end{bmatrix} \times \frac{b}{\cos \varphi} \times \begin{Bmatrix} H_a \\ E_a - H_a \end{Bmatrix} \quad (4.19)$$

Välituet

$$C = \begin{Bmatrix} Q_c & Q'_c & n_p \end{Bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,61 \cdot c_f + 55 \cdot c_{rs} + c_c & 0 & 0 \\ 0 & 0,56 \cdot c'_f + 28 \cdot c'_{rs} + c'_c & 0 \\ 0 & 0 & c_p \end{bmatrix} \times b \times \begin{Bmatrix} H_i - D_i \\ D_i \\ E_i - H_i \end{Bmatrix} \quad (4.20)$$

F-matriisit muodostuvat yksikkökustannuksista c , joiden alaindeksien merkitys selviää taulukosta 4.8.

Edellä olevan mukaan voidaan sillan osien kustannukset laskea, kun tunnetaan perusmitat ja yksikkökustannukset. Taulukoissa 4.9 ja 4.10 on yhteenveto m^2 -mallin yhteydessä esitetyn aineiston sillan osien kustannuksista. Ne perustuvat taulukossa 4.8 esitettyihin yksikkökustannuksiin, jotka on pyritty valitsemaan TVH:n yksikköhintaluettelon mukaisiksi. Teräksen yksikkökustannus c_{ss} on valittu TVH:n arvoa pienemmäksi, koska TVH:n arvo sisältää yhteiskustannukset. Näin voidaan rakenneteräkselle käyttää samaa yhteiskustannusten laskentatapaa kuin muille materiaaleille.

Taulukko 4.8 Mallin laatimisessa käytetyt yksikkökustannukset. Indeksi 100/80.

	Maa- tuet	Väli- tukien yläosa	Väli- tukien alaosa	Liitto- palkki- kansi	Bet. palk- ki	Bet. ko- telo
Muotit (mk/m^2) c_f	190	190	190	180	130	180
Raudoitus (mk/kg) c_{rs}	4,1	4,7	3,4	3,3	3,3	3,5
Betoni (mk/m^3) c_c	380	380	380	420	400	400

Paalut $c_p = 140 \text{ mk/m}$

Rakenneteräs $c_{ss} = 5,6 \text{ mk/kg}$

Jänneteräs $c_{ps} = 11,5 \text{ mk/kg}$

Kaide $c_r = 7,7 \text{ mk/kg}$

Pintarakenne $c_s = 140 \text{ mk/m}^2$

Teline, maasilta $c_{su} = 140 \text{ mk/m}^2$

Teline, vesistösilta, $l < 33 \text{ m}$ $c_{su} = 250 \text{ mk/m}^2$

Teline, vesistösilta, $l > 33 \text{ m}$ $c_{su} = 300 \text{ mk/m}^2$

Taulukko 4.9

Teräksiset vesistö sillat, 17 kpl
Sillan osien kustannukset kaavan (4.4) mukaan
(1000 mk, ind. 100/80).

Silta	Maatuet				Välituet				Kansi			Pinta- raken- teet
	E m	H m	∅ o	Kustan- nus	E m	D m	H m	Kustan- nus	b m	l m	Kustan- nus	
Sampilan 22,4+28+22,4	13 12,5	4,8 4,8	0 0	73 72	13,8 14,5	3 3	8,5 8,5	107 110	6,5	72,8	564	122
Visurin 23,4+29,4+23,4	9 9	4,9 4,9	18 18	98 98	11,4 11,4	6,9 6,9	11,4 11,4	180 180	10,5	76,2	879	171
Taininiemen 23,9+30+23,9	5,6 7	5,6 7	0 0	72 98	7 7,8	2,4 3,2	7 7,8	84 95	7,5	77,8	692	142
Hynnilänsalmen 24,2+30,7+30,6 +24,3	36 9	4,5 9	25 13	170 158	32 30 27	0 0 0	12 11 10	234 226 199	8,5	109,8	1090	215
Varpuvirtain 27,6+34,8+27,6	5,3 5,3	5,3 5,3	0 0	61 61	11,3 11,3	6,5 6,5	11,3 11,3	125 125	6,5	90	754	151
Karesuvanon 28+3x35 +28	15 18	6,4 6,6	0 0	139 155	21 26 22 19	4,6 7,4 5,7 4,8	10,6 13,6 12 10,6	211 273 237 202	9	161	1793	327
Mourusalmen 28+3x36 +28	9,6 14,4	4,8 4,8	0 0	76 91	12,1 14,8 15,4 13,7	7,2 9,6 10,2 8,8	12,1 14,8 15,4 13,7	151 186 191 167	7,5	164	1601	298
Kuusankosken 42+52+42	22 21	7,7 7,9	0 0	295 296	31,4 27	0 0	6 6	367 323	13,25	136	2857	357
Ivalojoen 42,3+53+42,3	19 19	8,3 8,3	0 0	267 267	30 30	3,8 3,8	11 11	390 390	11,5	137,6	2210	327
Korssundin 34+72+34	15 9,4	5,5 9,4	10 0	111 157	22 24,5	15,8 18,2	22 24,5	297 312	7,5	140	1798	255
Inkeröisten 39+66,4+39	5 5	5 5	0 0	108 108	5,5 5,5	0 0	5,5 5,5	100 100	13	144,4	2695	374
Lehtosalmen 36+82+36	16,4 20	8 8	0 0	181 198	19,5 19,5	9,4 9,4	19,5 19,5	291 291	8,5	154	2351	302
Pekkalän 37+53+5x60 +48	24 18	9,5 6,2	0 0	398 250	26,7 27 24,5 29 28,3 25,6 22,4	0 5,4 9 6,2 5,6 4 0	13,5 19,4 24,5 23,6 22,1 19,4 15,1	407 521 520 559 546 497 384	15	438	11593	1257
Tornionjoen 54+3x64 +54	7 19	7 6,3	39 0	271 300	12 14 14,6 14,2	5 7 7,3 7,2	12 14 14,6 14,2	372 455 469 441	17,5	300	9981	966
Vårdön 54+3x68 +54	15 15	7,4 7,4	0 0	173 173	26 42 35 26	14 20 20 14	26 30 30 26	340 534 466 340	8	312	4573	590
Kaitaisten 60+80+90 +90+80+60	12 6,6	12 6,6	0 0	284 127	15 35 63 44 27	0 11 16 15 5	15 29 34 31 19	146 483 880 629 338	8,5	460	8126	902
Kemijärven 72+90+78 +72	8 17	8 8	0 0	327 332	30 26 20	12 9 9	23 20 20	710 628 489	13,25	312	9500	819

Taulukko 4.10

Jännitettyt vesistö sillat, 14 kpl
Sillan osien kustannukset kaavan (4.4) mukaan
(1000 mk, ind. 100/80).

Silta	Maatuet				Välituet				Kansi		Telineet+ pintara- kentest	
	E m	H m	∅ o	Kustan- nus	E m	D m	H m	Kustan- nus	b m	l m	Kustan- nus	Kustan- nus
Könkään 26,4+33+26,4	5,7 4	5,7 4	0 0	80 51	8,9 10,3	1 2,2	8,9 10,3	79 95	8	85,8	658	336
Ruukinkosken 29+36+29	11,8 5,9	5 5,9	25 25	130 124	9,3 7,6	4,8 3,1	9,3 7,6	129 105	11,75	94	1030	503
Sipoonlahden 28,5+8x35 +20	7,2 8	7,2 8	0 0	317 382	23 46 50 50 50 48 43 33 10	3,5 5 4 4 4 4 4 4 4	10 11 10 10 10 9,6 9,6 9,6 10	404 712 744 744 744 718 659 540 267	12,5 (x2)	657	7825	4119
Hopeaseppien 29+36+36 +36+29	28 18	4,6 5	0 0	196 164	29 31 26 19	5,3 5 5 2,7	11,3 11,5 11,4 8,7	257 281 249 180	14	166	2567	1150
Kautun 30+6x39 +30+20	8 12,4	8 7,2	0 0	174 163	13,8 23,7 20,8 19,7 18,4 22,2 20,7 14,4	0 2,6 0 0 0 5,5 5,3 0	13,8 17,8 14,7 14,4 13 16,7 14,7 8,8	114 186 150 145 142 214 203 120	11,5	314	3553	1831
Savilahden 34+38+38 +34	21 21	7 7	0 0	327 327	27 27 28	2,9 6,4 2,9	14,3 17,9 14,6	456 507 467	12,4 (x2)	288	4110	1793
Halikon 34+42+34	32 7,8	6,6 7,8	20 20	303 199	34 23	0 0	15,7 16	241 167	13	110	1394	714
Hevosluodon 28,5+57+28,5	28 30	6 6	30 30	224 234	28,3 41	0,4 1,6	6,4 7	209 302	10,5	114	1530	614
Kiuralan 36,5+45+36,5	10 10	10 10	0 0	194 194	25,6 23,4	0 0	7,4 7,1	159 147	8,5	118	1305	532
Harjavallan 30+50+50 +30	18,9 18	6,6 6	0 0	226 201	20 20,1 18,6	13,5 13,7 12,6	20 20,1 18,6	250 269 240	14,5	160	2794	1144
Keikyän 45+54+45	15,2 11,6	6,5 6,7	0 0	202 186	16,2 13,2	8,6 5,6	16,2 13,2	213 171	12	144	1923	871
Luotsinmäen 41+65+45 +25	18 20	5,8 5,5	8 13	175 154	19,2 18,8 18	11,2 11 1,8	19,2 18,8 9,3	241 240 151	10,5	176	2509	949
Norssalmen 5x45	6,4 7,2	6,4 7,2	0 0	157 184	10,4 32 34 33	2,5 13,7 14,9 13,5	10,4 21 23 21,6	128 351 365 355	13	225	3075	1460
Kivisalmen 34+72+34	19,4 17,6	6 6	0 0	134 128	19,3 19	6,7 6,4	19,3 19	160 156	7,5	140	1365	570

Taulukoiden 4.9 ja 4.10 silloista on tiedossa myös toteutuneet rakennuskustannukset. Ne on esitetty taulukoissa 4.11 ja 4.12. Regressioanalyysin avulla on mahdollista ratkaista mallin (4.3) tuntemattomat k-kertoimet. Laskennan tuloksena saadaan yksikkökustannusmalli.

$$C \text{ (mk)} = 48900 + 58000 \cdot D_{\text{imax}} + 1,009 \cdot (C_d + C_s) + 2,010 \cdot (C_a + C_i) \quad (4.21)$$

$$31 \text{ kpl} \quad R^2 = 0,99$$

Mallin mukaan kuivan sillan yhteiskustannusten perusosa on 48.900 mk. Vesisyvyyden kasvaessa peruskustannukset kasvavat siten, että tuen vesisyvyyden ollessa 16,4 m saavutetaan 1 milj.markan raja. Tämän lisäksi sillan osien kustannukset on kerrottava yhteiskustannuskertoimella, joka on päällysrakenteelle huomattavasti pienempi kuin alusrakenteelle. Kertoimien erilaisuuteen vaikuttaa ainakin se, että alusrakenteiden kustannuskaavat eivät huomioi maatöiden kustannuksia. Ne on sisällytettävä yhteiskustannuskertoimeen.

Taulukoihin 4.11...4.14 on laskettu vertailuarvoja erikseen m^2 -mallin, yksikkökustannusmallin ja siltasuunnittelijan laatiman kustannusarvion suhteen. Vertailuarvo on toteutunut kustannus/arvioitu kustannus. Kaksi enimmäistä taulukkoa sisältävät mallien laadinnassa käytetyn aineiston. Kolmas taulukko käsittää maasiltoja ja neljäs sellaisia vesistösiltoja, joiden rakennuskustannukset poikkeavat oleellisesti arvioiduista.

Taulukko 4.11 Teräksiset vesistö sillat, 17 kpl.
Rakennuskustannukset (1000 mk, ind. 100/80)

Silta	Toteutunut kustannus	r = toteutunut kustannus/		
		m ² -malli	Yksikkökust. malli	Kustannus- arvio
Sampilan	1591	1,05	0,97	1,02
Visurin	2328	0,99	0,89	0,91
Taininiemen	1554	0,89	0,87	1,09
Hynnilänsalmen	3605	1,09	1,08	1,25
Varpuvirtain	1903	0,96	0,91	0,95
Karesuvannon	4790	0,98	0,95	0,93
Mourusalmen	3448	0,84	0,80	0,79
Kuusankosken	5965	0,96	1,02	1,03
Ivalojoen	5812	1,15	1,06	0,93
Korssundin	5185	1,24	1,05	1,20
Inkeröisten	4396	0,95	1,10	0,89
Lehtosalmen	5560	1,25	1,07	0,89
Pekkalän	23429	1,18	1,08	1,10
Tornionjoen	14784	1,07	0,92	0,88
Vårdön	10243	0,95	0,98	
Kaitaisten	16836	0,95	1,06	1,05
Kemijärven	15068	0,98	0,93	0,96
m		1,03	0,98	0,99
v		0,12	0,09	0,12

Taulukko 4.12

Jännitetyt vesistö sillat, 14 kpl.
Rakennuskustannukset (1000 mk, ind. 100/80)

Silta	Toteutunut kustannus	r = toteutunut kustannus/		
		m ² -malli	Yksikkökust. malli	Kustannus- arvio
Könkään	1996	0,97	(1,11)	0,96
Ruukinkosken	3189	1,04	(1,12)	0,99
Sipoonlahden	24046	1,02	0,97	(1,25)
Hopeaseppien	6589	0,92	0,97	(0,78)
Kautun	9872	1,00	1,09	(0,87)
Savilahden	10849	1,03	1,03	
Halikon	4034	(0,87)	1,01	0,92
Hevosluodon	4234	1,00	1,00	(0,73)
Kiuralan	3039	(0,85)	0,92	
Harjavallan	7139	0,97	0,99	
Keikyän	5098	1,01	1,04	
Luotsinmäen	5012	(0,84)	(0,82)	(0,75)
Norssalmen	9919	0,97	1,08	
Kivisalmen	3664	1,04	1,03	
m		0,97	1,01	0,91
v		0,07	0,08	0,19

Taulukko 4.13 Maasillat, 5 kpl.
Rakennuskustannukset (1000 mk, ind. 100/80)

Silta	Toteutunut kustannus	r = toteutunut kustannus/			Huom!
		m ² -malli	Yksikkökust. malli	Kustannus- arvio	
Äimäraution	7753	(1,23)	1,01		Liittopalkki
Kaunismäen	2473	(0,80)	(0,81)	(0,81)	Jännitetty
Tourulan	9193	1,07	(1,12)	1,07	Jännitetty
Eteläntien	3276	0,95	0,97	1,02	Jännitetty
Haapalahden	2360	(0,86)	0,90	0,91	Jännitetty
m		0,98	0,96	0,95	
v		0,18	0,12	0,12	

Taulukko 4.14 Poikkeavat vesistösillat, 6 kpl.
Rakennuskustannukset (1000 mk, ind. 100/80)

Silta	Toteutunut kustannus	r = toteutunut kustannus/			Huom!
		m ² -malli	Yksikkökust. malli	Kustannus- arvio	
Juutuanjoen	4476	1,74	1,56	1,29	Liittopalkki
Suomussalmen	4890	1,73	1,36	1,32	Liittopalkki
Hanhiluodon	1889	0,70	0,70	0,70	Jännitetty
Saharannan	2500	0,75	0,70		Jännitetty
Martin	3880	1,72	1,60	1,32	Jännitetty
Tervonsalmen	7592	1,44	1,43	1,40	Jännitetty

Mallien tarkkuutta arvioitaessa on huomattava, että taulukot 4.11 ja 4.12 eivät anna oikeata kuvaa m^2 -mallin eikä yksikkökustannusmallin tarkkuudesta. Tämä johtuu siitä, että samaa aineistoa on käytetty aikaisemmin mallin ker-toimien määrittämiseen. Näin on luonnollista että mallit antavat pienemmän hajonnan kuin kustannusarvio. Sensijaan taulukot 4.13 ja 4.14 käsittävät mallien kannalta uutta aineistoa, joten mallien ja kustannusarvion keskinäinen vertailu niiden perusteella on oikeutettua. Ongelmana on vain aineiston pienuus ja puutteellisuus.

Yhteenvedona voidaan todeta, että yksikkökustannusmalli antaa keskimäärin parempia tuloksia kuin m^2 -malli. Käsi-tellyn aineiston perusteella näyttää siltä, että yksikkö-kustannusmallin tarkkuus on samaa luokkaa kuin suunnitte-lijan kustannusarvion tarkkuus.

Yksikkökustannusmallin (4.21) avulla saadaan myös arvio sillan osien suhteellisista kustannuksista. Seuraavassa on kolmen sillan kustannusjakautumaa verrattu urakkahinto-jen mukaiseen jakautumaan.

Silta	Rakenneosia	Mallin antama kustannusjakau- tuma	Urakkahintojen jakautuma
Kemijärven	Alusrakenteet	30 %	27 %
	Teräsrakenteet	42 %	48 %
	Muu päällyys- rakenne	28 %	25 %
Norssalmen	Vedessä olevat välituet	25 %	28 %
	Muut rakenteet	75 %	72 %
Naarajoen	Teräsrakenteet	32 %	29 %
	Muut rakenteet	68 %	71 %

Mallin %-osuuksia laskettaessa on yhteiskustannusten pe-rusosa jaettu eri rakenneosille kustannusten suhteessa. Urakkahintojen jakautuma perustuu sillan osista tehtyihin erillisiin urakkasopimuksiin.

Esitetyistä numeroarvoista nähdään, että kustannusmalli antaa suuruusluokaltaan oikeat %-osuudet sillan eri osien kustannuksille. Tarkempien johtopäätösten teko edellyt-täisi lisäaineistoa toteutuneista kustannusjakautumista.

4.4 Kustannuslajimalli

Yksikkökustannusmallissa käytetään kunkin rakenneosan kullekin suoritenimikkeelle kiinteää yksikkökustannusta. Jotta näin päädyttäisiin oikeaan lopputulokseen, on yksikkökustannuksissa huomioitava sekä aine- että työkustannukset. Esim. kotelorakenteen muotin yksikkökustannus valitaan palkkirakenteen yksikkökustannusta suuremmaksi, koska kotelomuotti on työläämpi tehdä kuin palkkimuotti.

Yksikkökustannusmalli soveltuu huonosti tapauksiin, joissa halutaan tutkia aine- ja työkustannusten erilaisia muutoksia ja niiden vaikutusta lopputulokseen. Tällöin on syytä käyttää tarkempaa kustannusmallia, jolle otsikon mukaan valitaan nimeksi kustannuslajimalli. Siinä rakennusosan kukin suoritenimike jaetaan kustannuslajeihin, jotka lähteen /26/ mukaan ovat seuraavat:

- ainekustannukset
- työkustannukset
- alihankinnat
- omat palvelut.

Kustannusmallissa riittää kaksi kustannuslajia: aine- ja työkustannukset.

Kustannuslajimallin matemaattinen muoto poikkeaa yksikkökustannusmallista vain yksikkökustannusten määrittämistavan suhteen.

Ne määritetään seuraavasti:

$$c = c_m q_m + c_w q_w \quad (4.22)$$

jossa c on tarkasteltavan suoritenimikkeen yksikkökustannus

c_m on aineen yksikköhinta (mk/yks.)

c_w on työn yksikköhinta (mk/h)

q_m on ainemenekki ja

q_w on työmenekki.

Yksikköhinnat c_m ja c_w muuttuvat ajan mukana. Muutokset voidaan huomioida indeksien avulla. Ainemenekki q_m sisältää teoreettisen ainemenekin lisäksi eri työvaiheissa syntyvät ainehukat. Työmenekki q_w on kokemusperäinen suure. Siihen vaikuttaa lähinnä kaksi seikkaa:

- kohteen vaikeusaste ja
- rakenteiden toistuvuus.

Kustannuslajimallin käyttö edellyttää aineen ja työn yksikköhintojen tuntemista sekä seikkaperäistä tietoa eri rakenteiden aine- ja työmenekkeistä.

4.5 Virhetarkastelu

Kustannusmalli (4.3) voidaan kirjoittaa muotoon

$$C = C_0 + \sum k_i Q_i c_i = f(Q_i, c_i) \quad (4.23)$$

jossa Q_i on siltaosan ainemenekkiä vastaava suorite

ja c_i on sitä vastaava yksikkökustannus.

C_0 ja k_i ovat vakioita

Taylorin kaavan mukaan kustannusten muutos saadaan kaavasta

$$\Delta C = \sum \frac{\partial C}{\partial Q_i} \times \Delta Q_i + \sum \frac{\partial C}{\partial c_i} \times \Delta c_i \quad (4.24)$$

jossa ΔQ_i ja Δc_i ovat suoritteiden ja yksikkökustannusten muutokset

Pidetään muutoksia ΔQ_i ja Δc_i satunnaissuureina, joiden varianssit ovat $s_{Q_i}^2$ ja $s_{c_i}^2$. Tällöin kustannusvariانسsille voidaan johtaa lauseke

$$s_C^2 = \sum \left(\frac{\partial C}{\partial Q_i} \right)^2 s_{Q_i}^2 + \sum \left(\frac{\partial C}{\partial c_i} \right)^2 s_{c_i}^2 + \sum \sum \frac{\partial C}{\partial Q_i} \frac{\partial C}{\partial Q_j} R_{Qij} s_{Q_i} s_{Q_j} + \sum \sum \frac{\partial C}{\partial c_i} \frac{\partial C}{\partial c_j} R_{cij} s_{c_i} s_{c_j} + 2 \sum \sum \frac{\partial C}{\partial Q_k} \frac{\partial C}{\partial c_l} R_{Qckl} s_{Q_k} s_{c_l} \quad (4.25)$$

jossa R merkitsee korrelaatiokerrointa.

Oletetaan aluksi, että kaikki suoritteet Q ja yksikkökustannukset c ovat toisistaan riippumattomia. Tällöin $R_{ij} = R_{kl} = 0$ ja kaava (4.25) yksinkertaistuu huomattavasti. Sijoitetaan kaavaan variaatiokertoimet

$$v_C = \frac{s_C}{C}, \quad v_{Q_i} = \frac{s_{Q_i}}{Q_i} \quad \text{ja} \quad v_{c_i} = \frac{s_{c_i}}{c_i}$$

ja C :n osittaisderivaatat.

$$\begin{aligned}
 v_C^2 &= \sum \left(\frac{k_i c_i}{C} \right)^2 v_{Qi}^2 + \sum \left(\frac{k_i Q_i}{C} \right)^2 v_{ci}^2 \\
 &= \sum \left(\frac{C_i}{C} \right)^2 (v_{Qi}^2 + v_{ci}^2)
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

jossa $C_i = k_i Q_i c_i$ on osan i kustannus

Oletetaan, että $v_{Qi} = v_Q$ ja $v_{ci} = v_c$ ja ajatellaan kokonaiskustannusten muodostuvan n :stä samansuuruisesta osakustannuksesta, ts.

$$C_i = \frac{C}{n}$$

Silloin kokonaiskustannusten variaatiokertoimelle saadaan yksinkertainen lauseke

$$v_C = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{v_Q^2 + v_c^2} \tag{4.27}$$

jossa v_Q on suoritteiden variaatiokerroin ja
ja v_c on yksikkökustannusten variaatiokerroin

Havainnollisen kuvan saamiseksi eri tekijöiden vaikutuksesta kokonaishajontaan tarkastellaan seuraavia taulukointa.

$n = 1$	$\begin{matrix} v_Q \\ \backslash \\ v_c \end{matrix}$	0,1	0,2	0,4
	0,1	0,14	0,22	0,41
	0,2	0,22	0,28	0,45
	0,4	0,41	0,45	0,57

$n = 4$	$\begin{matrix} v_Q \\ \backslash \\ v_c \end{matrix}$	0,1	0,2	0,4
	0,1	0,07	0,11	0,21
	0,2	0,11	0,14	0,22
	0,4	0,21	0,22	0,28

$n = 9$	$\begin{matrix} v_Q \\ \backslash \\ v_c \end{matrix}$	0,1	0,2	0,4
	0,1	0,05	0,07	0,14
	0,2	0,07	0,09	0,15
	0,4	0,14	0,15	0,19

Ne esittävät kokonaiskustannusten hajonnan muodostumista suoritteiden ja yksikkökustannusten hajonnasta, kun osakustannusten lukumäärä on 1, 4 tai 9. Ensimmäinen taulukko vastaa lähinnä m^2 -mallia ja viimeinen taulukko yksikkökustannusmallia. Jos sekä suoritteiden että yksikkökustannusten hajonnaksi oletetaan 20 % ($v_Q=v_C=0,2$), saadaan kokonaiskustannusten hajonnaksi m^2 -mallissa 28 % ja yksikkökustannusmallissa 9 %.

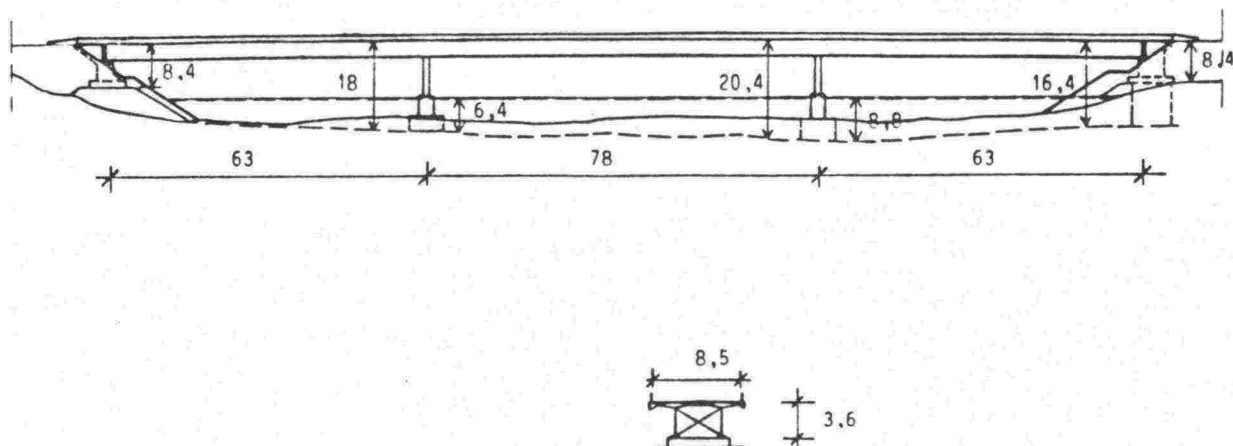
Kustannuslajimallia käytettäessä osakustannusten lukumäärä vielä kasvaa ja kaavan (4.27) mukaan kokonaishajonta pienenee. On kuitenkin muistettava, että kaavaa johdettaessa edellytettiin suoritteiden ja yksikkökustannusten riippumattomuutta. Tämä vaatimus täyttyy sitä huonommin mitä useampaan osaan kokonaiskustannukset jaetaan, joten hajonnan pieneneminen saattaa olla vain näennäistä.

Tarkastellaan vielä tapausta, jolloin suoritteiden tai yksikkökustannusten välillä esiintyy tilastollista riippuvuutta. Kaavasta (4.25) nähdään, että positiivinen korrelaatio kahden muuttujan välillä lisää hajontaa. Vastaavasti negatiivinen korrelaatio pienentää hajontaa. Positiivista korrelaatiota saattaa esiintyä suoritteiden välillä, jos suunnittelija käyttää "henkilökohtaista lisävarmuuskerrointa". Tällöin kaikki ainemenekit pyrkivät tulemaan tavanomaista suuremmiksi tai päinvastoin tavanomaista pienemmiksi. Myös yksikkökustannusten välillä positiivinen korrelaatio lienee tavallista. Esim. työ-
kustannusten ollessa tavanomaista suurempia sen vaikutus heijastuu lähes kaikkiin yksikkökustannuksiin. Negatiivista korrelaatiota esiintyy esim. sillan jänneteräsmäärän ja betoniteräsmäärän välillä. Varsinkin osittain jännite-
tyissä silloissa jänneteräsmäärä voidaan valita tavanomaista pienemmäksi, jolloin betoniteräsmäärä vastaavasti kasvaa.

Yhteenvedona muuttujien välisestä korrelaatiosta todetaan, että se lienee käytännössä melko yleistä. Positiivinen korrelaatio on tavallisempaa kuin negatiivinen korrelaatio. Senvuoksi kokonaiskustannusten hajonta on yleensä kaavan (4.27) antamaa teoreettista arvoa suurempi.

5. Esimerkki

Valitaan esimerkisillaksi kuvan 5.1 mukainen jatkuva liittopalkkisilta.



Kuva 5.1 Esimerkki. Jatkuva liittopalkkisilta.

Siltakannen päämitat ovat:

$$\text{painotettu jännemitta } l = \frac{63^2 + 78^2 + 63^2}{63 + 78 + 63} = 68,7 \text{ m}$$

$$\text{hyödyllinen leveys } b = 8,5 \text{ m}$$

$$\text{rakennekorkeus } h = 3,6 \text{ m}$$

Näistä saadaan ainemenekkimallien perusmitoiksi

$$\frac{l^2}{h} = 1312$$

$$\frac{h}{b} = 0,424$$

$$b = 8,5$$

$$\frac{1}{b} = 0,118$$

Matriisiyhtälöstä (4.5) saadaan päällysrakenteen kantavan osan ainemenekit:

$$\begin{Bmatrix} Q_{ss} \\ Q_c \\ Q_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 24,3 \\ 0,216 \\ 0,96 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,0748 & 272 & 0 & 0 \\ 0,000021 & 0 & 0,0072 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,2 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 1312 \\ 0,424 \\ 8,5 \\ 0,118 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 238 \text{ kg/m}^2 \\ 0,305 \text{ m}^3/\text{m}^2 \\ 1,22 \text{ m}^2/\text{m}^2 \end{Bmatrix}$$

Kannen pintarakenteiden ja kaiteiden ainemenekit saadaan yhtälöstä (4.12). Valitaan kaide, jonka teräsmäärä on

$$g = 38 \text{ kg/m.}$$

$$\begin{Bmatrix} Q_s \\ Q_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2g \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 1 \\ \frac{1}{b} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 76 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 1,118 \\ 0,118 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1,118 \text{ m}^2/\text{m}^2 \\ 8,94 \text{ kg/m}^2 \end{Bmatrix}$$

Maatukien ja välitukien ainemenekkikaavoissa tarvittavat mitat saadaan suoraan kuvasta 5.1.

Maatuen geometriatiedot ovat:

$$\frac{b}{\cos \varphi} = 8,5 \text{ m, sillä silta on suora}$$

$$l_a = 63 \text{ m}$$

$$H_a = 8,4 \text{ m}$$

Yhtälöstä (4.13) saadaan maatuen ainemenekit:

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ n_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1,252 \\ 1,52 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,0398 & 0,0146 & 0,1064 \\ -0,11 & 0,035 & 0,266 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 8,5 \\ 63 \\ 8,4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2,727 \text{ m}^3/\text{m}^2 \\ 5,02 \text{ kpl/m} \end{Bmatrix}$$

Välitukien geometriatiedot ovat:

Välituki 1

$$b = 8,5 \text{ m}$$

$$l_i = \frac{63 + 78}{2} = 70,5 \text{ m}$$

$$H_i = 18 \text{ m}$$

$$D_i = 6,4 \text{ m}$$

Välituki 2

$$b = 8,5 \text{ m}$$

$$l_i = 70,5 \text{ m}$$

$$H_i = 20,4 \text{ m}$$

$$D_i = 8,8 \text{ m}$$

Yhtälöstä (4.14) saadaan välitukien ainemenekit:

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ Q_c \\ n_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1,51 \\ 3,29 \\ 2,85 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,017 & -0,0033 & -0,014 & 0,014 \\ -0,099 & 0,0605 & -0,1058 & 0 \\ -0,194 & 0,1091 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 8,5 \\ 70,5 \\ 18 \\ 6,4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1,259 \text{ m}^3/\text{m}^2 \\ 4,81 \text{ m}^3/\text{m}^2 \\ 8,89 \text{ kpl/m} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} Q_c \\ Q_c \\ n_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1,51 \\ 3,29 \\ 2,85 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,017 & -0,0033 & -0,014 & 0,014 \\ -0,099 & 0,0605 & -0,1058 & 0 \\ -0,194 & 0,1091 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 8,5 \\ 70,5 \\ 20,4 \\ 8,8 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1,259 \text{ m}^3/\text{m}^2 \\ 4,56 \text{ m}^3/\text{m}^2 \\ 8,89 \text{ kpl/m} \end{Bmatrix}$$

Sillan kustannusarviota laadittaessa käytetään taulukon 4.8 yksikkökustannuksia.

Päällysrakenteen kantavan osan kustannus saadaan kaavasta (4.16), johon sijoitetaan

$$c_{ss} = 5,6 \text{ mk/kg}$$

$$c_{rs} = 3,3 \text{ mk/kg}$$

$$c_c = 420 \text{ mk/kg}$$

$$c_f = 180 \text{ mk/m}^2$$

$$b = 8,5 \text{ m}$$

$$\sum l = 63 + 78 + 63 = 204 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} C_1 &= \left\{ Q_{ss} \quad Q_c \quad Q_f \right\} \times \left\{ \begin{matrix} c_{ss} \\ 218 \\ c_f \end{matrix} \cdot c_{rs} + c_c \right\} \times b \times \sum l \\ &= \left\{ 238 \quad 0,305 \quad 1,22 \right\} \times \left\{ \begin{matrix} 5,6 \\ 1139 \\ 180 \end{matrix} \right\} \times 8,5 \times 204 = \underline{3\,294\,000 \text{ mk}} \end{aligned}$$

Kannen telineiden, pintarakenteiden ja kaiteiden kustannus saadaan kaavasta (4.18), johon sijoitetaan yksikkökustannukset

$$c_{su} = 0 \text{ (koska pääpalkit toimivat telineenä)}$$

$$c_s = 140 \text{ mk/m}^2$$

$$c_r = 7,7 \text{ mk/kg}$$

$$C_2 = \left\{ 1 \quad 8,94 \right\} \times \left\{ \begin{matrix} 140 \\ 7,7 \end{matrix} \right\} \times 8,5 \times 204 = \underline{362\,000 \text{ mk}}$$

Maatukien kustannukset saadaan kaavasta (4.19)

$$\text{sijoittamalla siihen } c_f = 190 \text{ mk/m}^2$$

$$c_{rs} = 4,1 \text{ mk/kg}$$

$$c_c = 380 \text{ mk/m}^3$$

$$c_p = 140 \text{ mk/m}$$

$$E_a = 8,4 \text{ m maatuella 1}$$

$$= 16,4 \text{ m maatuella 2}$$

$$C_{3,4} = \begin{Bmatrix} Q_c & n_p \end{Bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,77 \cdot c_f + 47 \cdot c_{rs} + c_c & 0 \\ 0 & c_p \end{bmatrix} \times \frac{b}{\cos \gamma} \times \begin{bmatrix} H_{a1} & H_{a2} \\ E_{a1} - H_{a1} & E_{a2} - H_{a2} \end{bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} 2,727 & 5,02 \end{Bmatrix} \times \begin{bmatrix} 909 & 0 \\ 0 & 140 \end{bmatrix} \times 8,5 \times \begin{bmatrix} 8,4 & 8,4 \\ 0 & 8 \end{bmatrix} = \left\{ \frac{177\ 000 \quad 225\ 000 \text{ mk}}{\quad} \right\}$$

Välitukien yksikkökustannukset ovat

$$\begin{array}{ll} c_f = 190 \text{ mk/m}^2 & c'_f = 190 \text{ mk/m}^2 \\ c_{rs} = 4,7 \text{ mk/kg} & c'_{rs} = 3,4 \text{ mk/kg} \\ c_c = 380 \text{ mk/m}^3 & c'_c = 380 \text{ mk/m}^3 \end{array}$$

ja perustamissyvydet

$$\begin{array}{ll} E_i = 18 \text{ m} & \text{välituella 1} \\ = 20,4 \text{ m} & \text{välituella 2} \end{array}$$

Välitukien kustannukset lasketaan kaavasta (4.20)

$$C = \begin{Bmatrix} Q_c & Q'_c & n_p \end{Bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,61 \cdot c_f + 55 \cdot c_{rs} + c_c & 0 \\ 0 & 0,56 \cdot c'_f + 28 \cdot c'_{rs} + c'_c \\ 0 & 0 & c_p \end{bmatrix} \times b \times \begin{Bmatrix} H_i - D_i \\ D_i \\ E_i - H_i \end{Bmatrix}$$

Välituella 1 saadaan

$$C_5 = \begin{Bmatrix} 1,259 & 4,81 & 8,89 \end{Bmatrix} \times \begin{bmatrix} 944,4 & 0 & 0 \\ 0 & 581,6 & 0 \\ 0 & 0 & 140 \end{bmatrix} \times 8,5 \times \begin{Bmatrix} 11,6 \\ 6,4 \\ 0 \end{Bmatrix} = \underline{269\ 000 \text{ mk}}$$

ja välituella 2

$$C_6 = \begin{Bmatrix} 1,259 & 4,56 & 8,89 \end{Bmatrix} \times \begin{bmatrix} 944,4 & 0 & 0 \\ 0 & 581,6 & 0 \\ 0 & 0 & 140 \end{bmatrix} \times 8,5 \times \begin{Bmatrix} 11,6 \\ 8,8 \\ 0 \end{Bmatrix} = \underline{316\ 000 \text{ mk}}$$

Sillan kokonaiskustannus saadaan kaavasta (4.21)

$$\begin{aligned}
 C &= 48900 + 58000 \cdot D_{\max} + 1,009 \cdot (C_1 + C_2) + 2,010 \cdot (C_3 + C_4 + C_5 + C_6) \\
 &= 48900 + 58000 \cdot 8,8 + 1,009 \cdot (3294000 + 362000) \\
 &\quad + 2,010 \cdot (177000 + 225000 + 269000 + 316000) \\
 &= \underline{\underline{6\,232\,000\text{ mk}}} \quad (\text{ind. } 100/80)
 \end{aligned}$$

Arvioidaan vertailun vuoksi sillan m^2 -kustannus kaavan (4.2) avulla sijoittamalla siihen arvot

$$\begin{aligned}
 b &= 8,5 \text{ m} \\
 D_{\max} &= 5 \text{ m} \\
 E &= 20,4 \text{ m} \\
 n &= 3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C \text{ (mk/m}^2\text{)} &= 3400 + 4765 \left(\frac{1}{\sqrt{b}} - \frac{1}{3} \right) + 20,89 \cdot (2 \cdot D_{\max} + E - 40) - 35,7 \cdot (n - 4) \\
 &= 3400 + 4765 \cdot 0,0097 + 20,89 \cdot (-9,6) - 35,7 \cdot (-1) \\
 &= 3281 \text{ mk/m}^2
 \end{aligned}$$

Sillan kokonaiskustannus on tämän mukaan

$$C = 3281 \cdot 8,5 \cdot 204 = \underline{\underline{5\,690\,000\text{ mk}}} \quad (\text{ind. } 100/80)$$

Tässä esimerkkitapauksessa yksikkökustannusmalli antaa siis 10 % suuremman arvion kuin m^2 -malli.

6. Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää menetelmiä, joilla voidaan arvioida siltojen ainemenekkejä ja rakennuskustannuksia. Työssä on kehitetty useita erilaisia ainemenekki- ja kustannusmalleja, joiden hajonta vaihtelee välillä $\pm 5... \pm 25$ %.

Työssä nojaututaan tilastolliseen analyysiin. On varsin luonnollista, että samaan tilastoaineistoon sovellettuna saadut ainemenekki- ja kustannusmallit antavat hyviä tuloksia. Uuteen aineistoon sovellettuna mallien tarkkuus on todennäköisesti huonompi. Senvuoksi olisi hyvä jatkaa tilastoaineiston keräämistä uusista siltakohteista. Sen avulla voitaisiin myöhemmin selvittää mallien tarkkuutta ja haluttaessa laskea niille uudet kertoimet.

Siltojen suunnittelun päämäärä on optimaalisen lopputuloksen saavuttaminen. Kustannusoptimointia voidaan suorittaa esim. seuraavien muuttujien suhteen:

- Sillan rakennuspaikka
- Sillan pituus
- Sillan tyyppi
- Jännemitat
- Rakennekorkeus
- Poikkileikkausmuoto

Luettelon alkupään muuttujat liittyvät esisuunnitteluun ja yleissuunnitteluun. Näissä vaiheissa ei vielä aseteta suuria tarkkuusvaatimuksia. Niinpä tässä työssä kehitettyjä kustannusmalleja voidaan hyvin käyttää siltojen rakennuskustannusten arviointiin. Mallit on helppo ohjelmoida tietokoneelle ja laatia niiden avulla suunnittelua helpottavia CAD-sovellutuksia.

Siltasuunnittelun edetessä lähemmäksi rakennesuunnitteluvaihetta optimoinnin tarkkuusvaatimus kasvaa. Kehitettyjen kustannusmallien avulla voidaan matemaattisesti laskea optimi esim. sillan jännemitoille ja päällysrakenteen rakennekorkeudelle, mutta lopputuloksen luotettavuuteen on syytä suhtautua kriittisesti. Siihen on seuraavanlaisia syitä.

Tilastojen käyttö mallien muodostamiseen aiheuttaa tarpeetonta hajontaa. Tämä johtuu mm. eroista tien geometriassa, sillan kuormituksissa ja normien tulkinnoissa. Ainemenekkimalleja voitaisiin tarkentaa laatimalla suunnitelmat samoilla perusteilla samoja suunnittelijoita käyttäen. Tällöin mallien muodostamiseen riittäisi tilastoaineistoa pienempi aineisto. Suunnittelumenetelmiä pitäisi yksinkertaistaa, jotta työmäärä ei nousisi kohtuuttoman suureksi.

Työssä kehitetyt kustannusmallit eivät pysty huomioimaan erikseen työ- ja ainekustannuksissa tapahtuvia muutoksia. Tämä olisi tärkeätä verrattaessa toisiinsa massiivisia rakenteita ja keveämpiä, paljon työtä vaativia rakenteita. Tässä suhteessa voitaisiin ehkä kustannuslajimallia käyttämällä päästä parempiin tuloksiin.

Eräs vaikeus siltakustannusten tarkastelussa on urakkahintojen suuri vaihtelu. Voidaan olettaa, että se heijastuu myös toteutuneisiin kustannuksiin. Tarkempaan tulokseen päästäisiin, jos kaikkien suunnitelmien hinnoittelu suoritettaisiin samoilla periaatteilla saman rakentajan toimesta.

Siltojen rakennuskustannuksiin vaikuttavia tekijöitä on kirjallisuudessa tutkittu verrattain vähän. Sensijaan rakenteellisia optimiratkaisuja haetaan eri puolilla maailmaa ja aihepiiristä julkaistaan jatkuvasti uusia tutkimustuloksia. Maailmalla tapahtuvan kehityksen seuraamiseksi olisi syytä tehdä aiheesta tässä työssä esitettyä laajempi kirjallisuusselvitys.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Tilastomatematiikka

1. Ang, A. H.-S. & Cornell, C.A., Reliability bases of structural safety and design. J. Struct. Div. ASCE100, (ST9), Proc. Paper 10777, Sept. 1974, p. 1755...1769.
2. Hannus M., Rakenteiden varmuuden arviointi todennäköisyyslaskennan menetelmin. Rakenteiden mekaniikka 2 (1972) 4, p. 439...463.
3. Moses, F., Structural system reliability and optimization. Comp. Struct. v 7 n 2 Apr. 1977, p. 283...290.
4. Tilastomatematiikan perusteet II, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus/Suomen teknillinen seura, 1964.

Siltojen ainemenekit

5. Bieger, K.W., Stahl-und Spannbetonbrücken. Eine Zusammenstellung ausgeführter Brückentragwerke, Technische Universität Hannover, 1973, 26 S.
6. Handbuch für den Stahlbau. Band IV. Verlag für Bauwesen, Berlin 1974. 624 S.
7. Helming, E., Der absolute und spezifische Materialaufwand für Brückentragwerke aus Spannbeton im Zuge neuzeitlicher Strassen. Die Bautechnik, 1978, S. 5...15, 83...91, 133...143.
8. Herzog, M., Stahlgewichte moderner Eisenbahn - und Strassenbrücken. Der Stahlbau (1975) 9, S. 280...282.
9. Jensen, J.J. & Skogland, J.O., Norske betongbroer - en tekniskøkonomisk analyse. Nordisk betong (1976) 1, s. 19...27.
10. Langrock, J., Schuchardt, J. & Verch, W., Betonbrückenbau. Verlag für Bauwesen, Berlin 1979. 552 S.
11. Maisel, B.J., Rowe, R.E. & Swann, R.A., Concrete box-girder bridges. The structural engineer (1973) 10, p. 363...376.
12. Siltojen ainemenekkejä, Vuosina 1975-1977 suunnitellut sillat. TVH, sillansuunnittelutoimisto. Helsinki 1979.

13. Siltojen ominaistietokortteja ja yleispiirustusten pienennöksiä. TVH, 1975...1983.
14. Swann, R.A., A feature survey of concrete box spine - beam bridges. Technical Report. Cement and concrete association, 1972. 77 p.
15. Voest - Alpine Stahlbrückenbau. Itävaltalainen esite.

Kustannukset

16. Barnes, N.M.L., The use of cost models for evaluating alternative design and construction strategies, p. 31...35.
17. Bostanziev, K., K voprosy o naznazenij optimalnoj dliny proletoy avtodoroshnih mostov s yzetom ih gidrologizeskoj raboty (Zur Frage der Bestimmung der optimalen Spannweite von Strassenbrücken unter Berücksichtigung ihrer hydrologischen Verhältnisse). Trudy sib. avtomob.-doroz. inst. 8 (1975), s. 104...113.
18. Haahtela, Y., Kiiras, J., Rakennuttajan ja suunnittelijan kustannustieto. Helsinki, Insinööritieto Oy, 1980. 137 s.
19. Kirmanen, T., Tie- ja vesirakennuslaitoksen sillanrakennustuotannon tuottavuuden mittaaminen. Diplomityö, Helsinki 1980.
20. Liede, J., Rakennuskustannusten ennakointi tilastomatematiikan mallien avulla. Diplomityö, Helsinki 1972.
21. Luutonen, V., Rakennetyypin vaikutus sillanrakennustöiden kustannustekijöihin. Diplomityö, Helsinki 1979.
22. Maggs, M.F., Cost models for Bridgeworks. Proc. of a Symposium at Univ. College, London 1969, p. 55...65.
23. Ostler, P., Estimation of bridge construction costs: Program COSMOS. TRRL Supplementary report 404. Crowthorne, 1978. 19 p.

24. Ostler, P., Bailey, A.C. & Stott, J.P., Estimating highway construction costs: Program COSMOS. TRRL Report, 1979. 14 p.
25. Saukkonen, R., Eri siltatyyppeiden kustannusmallit. Diplomityö, Helsinki 1983.
26. Talo 80. Yleisseloste. Rakentajain Kustannus Oy, Helsinki 1981. 131 s.
27. Valmistuneiden siltojen m²-kustannuksia 1975...1981. TVH.

